

## О СОЗДАНИИ СОВРЕМЕННОЙ СИСТЕМЫ ОБРАЩЕНИЯ С ЖИДКИМИ РАДИОАКТИВНЫМИ ОТХОДАМИ НА АЭС УКРАИНЫ. КОНДИЦИОНИРОВАНИЕ ЖИДКИХ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ

Рассматриваются подходы к созданию технологической системы включения жидких радиоактивных отходов (ЖРО) в твердую матрицу с получением конечного продукта, отвечающего требованиям захоронения. Оперативное решение данной задачи позволит снять острую проблему накопления ЖРО на действующих АЭС Украины [1], завершить цикл обращения с жидкими отходами и сосредоточить потенциал отрасли на поиске и внедрении современного комплекса обращения как с жидкими отходами, так и с радиоактивно загрязненными водами в целом.

*Ключевые слова:* цементирование, включение в полиминеральную матрицу, гибкая технология, анализ зарубежного опыта, принятые решения.

### Введение

Кондиционирование ЖРО в целом необходимо рассматривать в контексте стратегии минимизации радиоактивных отходов (РАО) с учетом возрастающих требований безопасности. Это в свою очередь требует обновления нормативной базы. Например, для надежного и эффективного обращения с эксплуатационными РАО АЭС и выполнения требований безопасности МАГАТЭ в сфере обращения с РАО в Украине необходима разработка и утверждение критериев приемки РАО АЭС на долговременное хранение/захоронение [2]. Необходимо отметить, что на сегодняшний день у нас нет документально оформленных требований к отвержденным ЖРО. Поэтому для оценки показателей качества компаундов приходится использовать норматив, принятый в России (ГОСТ 51883-2002).

Принципиальным вопросом технологии кондиционирования методом цементирования является разработка вяжущих (создание рецептуры компаунда). Над этой проблемой успешно работает Научно-исследовательский институт вяжущих материалов Киевского национального университета строительства и архитектуры (НИИВМ).

### Зарубежная и отечественная практика кондиционирования ЖРО

Из доступных зарубежных и отечественных источников информации следует, что при выборе метода отверждения большинство специалистов сегодня отдают предпочтение цементированию и остекловыванию (в целом – к включению в неорганическую матрицу), что обусловлено, прежде всего, вопросом безопасности и экономическими соображениями. Следует отметить также, что за рубежом уже более 30 лет проводятся работы по применению гипсования [3]. Есть сведения о том, что для цементирования борсодержащего концентрата к нему при pH 6,5 - 7 добавляют на 1 кг борной кислоты 1 кг песка, 0,8 кг цемента и 0,07 кг гипса (время твердения смеси 28 сут, а вымываемость по  $Cs^{137}$   $2 \cdot 10^{-3}$  г/(см<sup>2</sup> сут).

Добавка к связующим (гипсу, цементу) силиката натрия (жидкого стекла) улучшает практически все основные показатели: прочность, степень наполнения, совместимость с основными компонентами отходов, вымываемость.

Для увеличения степени наполнения и снижения вымываемости в практику отверждения отходов вошло так называемое “сухое” цементирование, когда водоцементное отношение сокращается с 0,7 (обычного) до 0,35 - 0,4 (связанное с этим ухудшение текучести цементного теста не играет роли, когда формирование твердого продукта производится в транспортной таре). В мировой практике уже длительное время для изменения физико-химических свойств цементов и улучшения их совместимости с отходами используются укрепляющие добавки (цеолиты; вермикулит; глины; двуокись кремния; диатомы для связи избыточной воды; органические производные; формальдегид для предотвращения размножения бактерий, вызывающих газообразование).

Тенденции развития способов отверждения за рубежом можно видеть из краткого обзора, приводимого ниже.

Кондиционирование ЖРО происходит путем смешения их с цементом (цементным раствором), битумом или полимером (полистиролы, формальдегидная смола, полиэфиры, эпоксины, полиэтилен) с последующим отверждением полученной массы. Предложены различные варианты изменения состава

© О. Б. Андронов, В. Н. Безмылов, 2015

вов неорганической матрицы и цементов добавкой различных глин, полимерных материалов и др. Технологический цикл включает выделение радионуклидов из жидких отходов с локализацией токсичных концентратов в минимальном объеме. При этом существенное внимание обращают на удаление балластных (нерадиоактивных) солей, что в свою очередь уменьшает затраты материалов при цементировании.

Сравнение разных способов отверждения среднеактивных (САО) или низкоактивных (НАО) отходов показывает, что все три типа матриц (битум, цемент, полимеры) являются монолитными без остатков свободной воды. Цемент и полимеры - более прочные вещества, их прочность определяется соответственно значениями 300 - 600 и 2000 кг/см<sup>2</sup>. Полимеры и битум пожароопасны (полимеры горючи и частично разрушаются в огне, битум плавится и воспламеняется, поэтому их масштабное применение в будущем вызывает сомнения) [3].

Важное место занимает выбор оборудования.

На площадках АЭС могут быть применены как стационарные, так и мобильные установки кондиционирования. Ранее стационарные установки сооружались на каждой площадке зарубежных АЭС. В ряде стран распространение получает использование мобильных установок для кондиционирования как НАО, так и САО. В Великобритании фирма BNFL Environmental Services эксплуатирует с 2003 г. первую в стране мобильную установку для отверждения САО (Transportable ILW Solidification Plant - TILWSP) [4]. TILWSP предназначена для обработки шламов и отработавших ионообменных смол. На установке предусмотрены операции не только по обработке влажных САО, но и их последующей упаковке в стандартные контейнеры. Влажные САО помещаются в барабаны емкостью 3 м<sup>3</sup>, в которых проводится их обезвоживание и цементирование. После проверки качества отвержденной массы отходы заливают цементным раствором и закрывают крышку барабана. При помощи дистанционного оборудования барабан с кондиционированными САО помещают в экранированную транспортную упаковку и вывозят на специальную площадку для хранения САО.

Во Франции кондиционирование технологических отходов и очень низкоактивных ионообменных смол проводится в стальных барабанах. Все другие типы отходов кондиционируются в железобетонных контейнерах, которые имеют внутреннюю стальную оболочку.

На площадках АЭС с PWR-900 и некоторых АЭС с PWR-1300 имеются стационарные установки по капсулированию фильтров и цементированию в железобетонных контейнерах шламов и концентратов от выпаривания. Для кондиционирования таких отходов на других АЭС используют мобильные установки ввиду их экономичности и более простого способа эксплуатации.

Цементирование НАО и САО в ближайшие десятилетия, вероятно, останется во многих странах наиболее простым, дешевым и достаточно безопасным методом кондиционирования. Основные преимущества цементирования: низкотемпературный процесс; хорошо проверенная технология; цементированный продукт не является горючим и имеет хорошую тепловую стабильность, химически и биохимически устойчив; все формы отходов могут быть включены в цементную матрицу. Цементированием можно добиться надежной эффективной иммобилизации отходов, снизив их загрузку в цемент, но это увеличивает объем конечных продуктов. Кроме того, при использовании этого метода содержащиеся в отходах соли мешают основным процессам гидратации цемента, что приводит к ухудшению качества цементированного продукта с течением времени.

Фирма NUKEM GmbH (Германия) много лет предлагает установки по цементированию с различными способами смешивания. Среди них в поставках фирмы с середины 1990-х годов наибольшее распространение получил высокоэффективный способ смешивания в барабане (High Performance In-Drum Mixer - HPIDM) [5]. Примерами поставок продукции фирмы могут служить:

Украина, Хмельницкая АЭС (ХАЭС) - установка цементирования с наклонным смесителем для Центра обработки отходов;

Китай, АЭС «Циньнань», Институт атомной энергии, корпорация Jiangsu Nuclear, CIAE - установка цементирования в 200-литровом барабане;

Словацкая республика, АЭС «Яслоvsке Богунице» - установка цементирования с наклонным смесителем для Центра обработки отходов;

Россия, Балаковская АЭС - установка цементирования с наклонным смесителем для Центра обработки отходов.

Способ HPIDM применим как в стационарных, так и мобильных установках (DEWA., MOWA). В зависимости от радиационного уровня возможно контактное и бесконтактное управление установкой. В мобильных установках DEWA процесс цементирования осуществляется непосредственно в контейнерах с отходами; цемент загружается заранее. К отходам нет особых требований, они могут

содержать до 25 % борной кислоты и до 35 % сухого материала. Система MOWA имеет особенности и преимущества компактной установки, поскольку отходы транспортируются и хранятся в 20-футовых контейнерах, имеющих стандарт ISO. Система имеет высокую пропускную способность по отходам (возможно использование барабанов нескольких размеров (100 - 400 л)) и различную защиту.

На установке MOWA можно обрабатывать концентраты, пульпу, гранулированные смолы с высокой удельной активностью. Технические данные MOWA: длина 5700 мм, ширина 2220 мм, высота 2180 мм; масса 22 000 кг. Пропускная способность: пульпа/концентрат - до  $10 \text{ м}^3$  в смену; смола - до  $2 \text{ м}^3$  в смену [5].

Проводятся исследования по усовершенствованию состава цементной матрицы, в том числе с целью снижения выщелачивания  $\text{Cs}^{137}$  и уменьшения образования водорода в результате процесса коррозии алюминия, содержащегося в цементе. Установлено, что добавление в цемент нитрата лития снижает образование водорода примерно в 10 раз, а добавление цеолита (клиноптилолита) в 10 раз снижает скорость выщелачивания  $\text{Cs}^{137}$ .

Развитие получила также технология остекловывания. Хотя процесс остекловывания был разработан первоначально для обработки высокоактивных отходов (ВАО), в настоящее время он используется для кондиционирования НАО и САО. Остекловывание НАО имеет преимущество с точки зрения минимизации отходов и приемлемо для всех НАО, образующихся на АЭС.

В США действуют и планируются новые промышленные установки по остекловыванию НАО, а также смешанных отходов. Продемонстрирована возможность остекловывания смешанных НАО, представляющих гранулированный активированный уголь, загрязненный химическими и радиоактивными элементами. Пропускная способность промышленной установки, введенной фирмой ATG в эксплуатацию в 2001 г. в Ханфорде,  $158,5 \text{ кг/ч}$ .

Компания AMEC Nuclear (Великобритания) разработала технологию GeoMelt, которую рассматривают как одно из наиболее эффективных решений стабилизации НАО до удаления [6]. В результате процесса GeoMelt (остекловывание непосредственно в контейнере) происходит иммобилизация радиоактивных загрязнений и тяжелых металлов, разрушение других токсичных загрязняющих веществ с образованием прочного стеклообразного продукта. Осуществимость этой технологии была подтверждена горячими испытаниями в опытном масштабе. Технология GeoMelt выбрана для остекловывания НАО в Ханфорде после обработки и остекловывания всех ВАО и некоторых НАО, хранящихся в 177 подземных резервуарах в Ханфорде.

Установка, строящаяся в Ханфорде для остекловывания НАО (Hanford Vitrification Plant), является частью комплекса по обработке и иммобилизации отходов (Waste Treatment and Immobilization Plant - WTP), известного также как «установка по остекловыванию» (VitPlant). Комплекс предназначен для обработки ЖРО, хранящихся в Ханфорде в подземных резервуарах. В составе комплекса четыре отделения - для предварительной обработки отходов, для остекловывания НАО и ВАО и аналитическая лаборатория. Общая площадь комплекса составит 26,3 га. Комплекс VitPlant должен быть построен к 2016 г. и введен в действие в 2019 г. Общая стоимость составит 12,2 млрд дол. [7].

Однако процесс остекловывания, использующий дорогое плавильное оборудование со сложными системами газоотвода, сопровождается образованием вторичных отходов. Вследствие этих недостатков продолжают исследования по выявлению новых связующих материалов (матриц) для иммобилизации НАО/САО. В частности, в США разрабатывается низкотемпературный способ стабилизации соледержащих отходов с использованием фосфатной керамики. В этом процессе происходит взаимодействие оксида магния с фосфатом калия и солями отходов, в результате чего образуется плотный монолит с низкой пористостью, состоящий в основном из фосфатов магния и калия.

В Республике Корея на АЭС «Ульджин» в 2007 г. была введена в эксплуатацию установка Ulchin Vitrification Facility (UVF) по остекловыванию НАО/САО в холодном тигле (cold crucible melter - ССМ) [4]. НАО/САО, образующиеся на АЭС «Ульджин-1 и -II» (четыре блока), содержат 26 % жидких концентратов, 18 % отработавших ионообменных смол, 4 % отработавших фильтров и более половины смешанных неоднородных отходов. Использована технология, представляющая собой одностадийный процесс сжигания и остекловывания НАО/САО. В результате комбинации плавильной печи с холодным тиглем и печи с плазменной горелкой (plasma torch melter - РТМ) можно проводить раздельно остекловывание горючих и плавление негорючих отходов. Мощности плавителей ССМ и РТМ на установке составляют 300 и 500 кВт соответственно [8].

В 2013 г. в Украине была презентована технология кондиционирования ЖРО, разработанная на АЭС «Ясловске Богунице» (Словакия), основанная на включении отходов в геополимерную матри-

цу SIAL [9]. Результаты испытаний технологии на ЗПЖРО ЧАЭС не дали достаточных оснований для ее промышленной реализации на украинских АЭС. Испытания планируется продолжить.

Позитивным отечественным вкладом в решение проблемы кондиционирования ЖРО следует считать исследования, проведенные на ХАЭС, по изучению стадий образования твердых компаундов при отверждении реальных кубового остатка (КО) и солевого плава (СП) и анализу свойств полученных твердых компаундов. Исследования показали, что с помощью полиминеральных сорбентов есть возможность получения твердого продукта, пригодного для последующего длительного хранения и захоронения. Работа не была завершена (данные по 2004 г.)

### Цементирование

Разработка специальных рецептов компаунда, позволяющих цементировать соленасыщенные растворы с получением необходимого по нормативам продукта - это основа технологии цементирования. В прошлом предел насыщения солями при цементировании согласно СПОРО-85 ограничивался величиной 200 г/л, поскольку при его увеличении существенно ухудшались качественные показатели цементного камня. В настоящее время успешно опробованы технологии цементирования растворов с высоким солесодержанием (от 750 г/л – ЗПЖРО ЧАЭС до 950 г/л – Ростовская АЭС).

Рецептура компаунда должна обеспечивать необходимые качественные показатели цементного камня на протяжении срока хранения 300 лет. В Украине пока нет документально оформленных требований к отвержденным ЖРО, что вынуждает разработчика ориентироваться на нормы, принятые в РФ [10]:

- скорость выщелачивания (по Cs), г/см<sup>2</sup>·сут - не более 10<sup>-3</sup>;
  - механическая прочность (предел прочности при сжатии), МПа (кг/см<sup>2</sup>) - не менее 4,9 (50);
  - морозостойкость (при -40...+40°С), циклов - не менее 30 (\*);
  - устойчивость к длительному пребыванию в воде (иммерсия), сут - 90 (\*);
  - радиационная стойкость при облучении дозой, Гр - 106(\*).
- (\* ) - снижение предела прочности на сжатие после испытаний не более 25 %.

Рассмотрим подробнее два показателя качества конечного продукта кондиционирования: долговечность и скорость выщелачивания. В отношении долговечности конечного продукта с точки зрения сохранения им прочностных свойств прямые исследования искусственного камня на основе любого из известных на сегодня вяжущих гидратационного твердения, в том числе и щелочных вяжущих систем, подтверждающие их долговечность на протяжении не менее 300 лет, не проводились. Причиной является то, что, например, портландцемент известен менее 200 лет (Е. Чилиев, 1822 г., Д. Аспдин, 1824 г.), а вяжущие щелочные системы - менее 60 лет (В. Д. Глуховский, 1957 г.).

Долговечность материалов определяется взаимодействием и взаимным влиянием разных факторов, основные из которых: условия эксплуатации; особенности конструктивных решений сооружений; выщелачивание; внутренняя коррозия; степень совместимости материалов композиции; стойкость к попеременному замораживанию и оттаиванию, стиранию и износу; влияние состояния конструкции на ее стойкость и др.

Однако существует ряд косвенных показателей и признаков, которые указывают, что камень на основе щелочных вяжущих систем способен обеспечить требуемые эксплуатационные характеристики на протяжении 300 и более лет.

В настоящее время внимание науки о цементе приковано к сооружениям древности, изготовленным из искусственных смесей, компонентами которых были сода и поташ. Еще в прошлом столетии предпринималась попытка разгадать причины исключительной долговечности древнего бетона, в связи с чем был исследован минералогический состав цементного камня ряда древних сооружений, сохранившихся в условиях длительного воздействия различных агрессивных факторов [11 - 13]:

- римский акведук (Кесария) - грунтовые, проточные воды;
- римский причал - пресная проточная вода;
- стены гавани (Кесария) - средиземноморская морская вода;
- термы (римские бани) - горячая вода минеральных источников

В структуре древних бетонов обнаружены искусственные новообразования, являющиеся аналогами природных цеолитов типа  $\text{Na}_2\text{O}(\text{K}_2\text{O}) \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot (2 - 4)\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ .

В то же время известны многочисленные случаи быстрого разрушения портландцементного бетона (после 30...50 лет эксплуатации), использованного для реставрации древнеримских сооружений, в то время как древние бетоны, работающие в аналогичных климатических условиях, продолжают эксплуатироваться более 2000 лет.

**Химический состав древних известково-пуццолановых цементов**

Наименование территории	Массовая доля оксидов, %				
	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O + Na <sub>2</sub> O	CaO + MgO	CO <sub>2</sub>
Древняя Греция (350 лет до н.э.)	18,0	4,30	1,44	45,9	13,1
Сирия (Тель-Рамад, 70 лет до н.э.)	24,6	4,92	1,55	41,8	25,9
Египет (пирамида Хеопса)	3,10	0,50	0,20	52,6	41,4
Древний Рим (169...140 лет до н.э.)	42,0	14,4	4,20	39,2	-

Формат статьи не предполагает подробного описания щелочных вяжущих систем.

Отметим, что весомый вклад в реализацию технологии цементирования ЖРО внесли работы украинских ученых. Так, НИИВМ в плане разработки пакета D-2 Стратегии реализации проекта ЗПЖРО и с учетом требований [10, 14] проведен ряд исследований по определению: радиоактивных свойств конечного продукта с реальными ЖРО; влияния щелочных цементов различных производителей на рецептуры растворных смесей и характеристики конечного продукта; влияния каолина на рецептуру растворной смеси и свойства конечного продукта; долговечности (аналитическая оценка) конечного продукта в части сохранения прочностных свойств; соответствия характеристик конечного продукта требованиям, изложенным в критериях приемки в специально оборудованное приповерхностное хранилище твердых радиоактивных отходов (СОПХТРО), а также в ТЗ.

Надежность связывания радионуклидов обеспечивается тем, что многие из радионуклидов (в первую очередь щелочные и щелочноземельные типа цезия, стронция, натрия, калия) способны химически входить в структуру цеолитоподобных новообразований и прочно фиксироваться в них. Другие нещелочные радионуклиды могут достаточно надежно связываться физически цеолитами шлакощелочного цементного камня, обладающими сорбционными свойствами [11].

Доказательством высокой эффективности использования щелочных цементов в качестве вяжущего материала для иммобилизации ЖРО можно считать тот факт, что такие природные цеолиты, как анальцит, шабазит, содалит, натролит, клиноптилолит, морденит и др., имеющие также место при формировании структуры камня на щелочных цементах, способны к катионному обмену натрия и калия на цезий, а кальция на стронций. Эти данные подтверждают повышенную надежность локализации радионуклидов в матрице искусственного камня на основе щелочных цементов, а высокие сорбционные свойства цеолитоподобных новообразований, синтезирующихся в щелочном цементном камне, служат дополнительным фактором надежности связывания радионуклидов. Следует отметить, что независимо от направленности и масштабности технологического процесса использования щелочных цементов формирование свойств искусственного камня будет сопровождаться синтезом вышеуказанных структурных формирований, обеспечивающих высокую плотность камня и стабильность структурных соединений в условиях выщелачивания.

При проведении исследований в качестве вяжущего материала использовалась продукция отечественного производителя: цемент ЛЦЕМ I-400 по ДСТУ Б В.2.7-187:2009 производства ЧП «Экосплав», а в качестве добавок - пластификатор «Полипласт СП-3» по ТУ 5870-006-58042865-05, каолин ООО «Просьянский ГОК» марки КР-2 по ГОСТ 19608-84 и портландцемент ПЦ I-500 (ДСТУ Б В.2.7-46-96) ООО «Волынь-Цемент» (г. Здолбунов). Для определения влияния качественных характеристик цементной составляющей на характеристики растворных смесей и характеристики отвержденного конечного продукта дополнительно использовали цементы ЛЦЕМ I-400 по ДСТУ Б В.2.7-187:2009 других производителей, а именно цемент на шлаке ЧП «Голден Технолджис Компани» и цемент, производимый ООО «Промцемент». В качестве материалов, входящих в состав шлакощелочных цементов, рассмотрены гранулированные доменные шлаки запорожского металлургического комбината (производитель молотого продукта ЧП «Голден Технолджис Компани»), мариупольского металлургического комбината им. Ильича и криворожского комбината «Арселор Миттал Кривой Рог».

**О выборе технологии для украинских действующих АЭС**

Как отмечалось в работе [1], с целью оперативного решения проблемы кондиционирования ЖРО АЭС Украины специалистами экспертной группы НТЦ НАЭК «Энергоатом» выбрано цементование. Кондиционирование ЖРО методом цементирования освоено в РФ на Ростовской АЭС

(ВВЭР), где действует установка отверждения (УО), и в Украине на заводе по переработке ЖРО (ЗПЖРО) ЧАЭС (РБМК).

Разработчиком комплексной технологии цементирования для Ростовской АЭС является Открытое акционерное общество «Свердловский Научно-исследовательский институт химического машиностроения» (ОАО СВНХМ). УО находится в опытно-промышленной эксплуатации с 2005 г. и в настоящее время выполняет операции по цементированию только кубовых остатков (КО). При реализации проекта персоналом обнаружен ряд недостатков в проекте, которые устранялись в процессе наладки и испытаний. Потребовалась также отработка рецептуры смеси для приведения продукта переработки в соответствие с требованиями, действующего в атомной энергетике России РД 95 10497-93 (руководящий документ «Качество компаундов, образующихся при цементировании»). В отработке рецептуры компаунда принимали участие ВНИИНМ, СВНХМ, ЗАО НПО «Энергохимпроект» и НПО «Родон». Матрица представляет собой цементно-глиняную смесь (смесь бентонита и портландцемента марки М500 (ПЦ 1-500) российских производителей в пропорции 1:9). Рецептура состава цементного компаунда: концентрат КО – 38 %; ПЦ + бентонит – 59 %; раствор NaOH(46 %) – 3 %. С 2011 г. после модернизации установки перешли с бочечного на контейнерное хранение отвержденных отходов (контейнеры НЗК-150-1,5П), что позволило упростить и удешевить технологический процесс.

Технологический процесс выстроен таким образом: концентрирование КО; подготовка смеси цемента с технологическими добавками (СЦД); смешение концентрированного КО (ККО) с СЦД; расфасовка цементного компаунда в контейнер НЗК; транспортировка контейнеров в отстойник; транспортировка контейнеров после отстоя в хранилище ТРО спецкорпуса (ХТРО СК).

Установка состоит из четырех основных технологических узлов: приема, подготовки и дозирования ЖРО; приема, подготовки и дозирования цемента; смешения; расфасовки с транспортной системой.

Принятие решения по использованию опыта Ростовской АЭС в Украине осложняется тем, что нет документа, подтверждающего соответствие конечного продукта всем требованиям ГОСТ 51883-2002 и нет расчета стоимости кондиционирования и хранения конечного продукта.

ЗПЖРО – это первый опыт Украины в решении проблемы создания технологии завершающей стадии обращения с жидкими отходами. Технология цементирования для ЗПЖРО создана отечественным разработчиком – НИИВМ. В технологии применяются следующие материалы и реагенты: цементы ЛЦЕМ 1-400 и ПЦ-500, пластификатор СП-3, добавки специального назначения (нитрат кальция), разжижающие добавки (Pozzolith 400 N), добавки (PPFeNi), NaOH, HNO<sub>3</sub>.

Функции ЗПЖРО состоят в следующем: извлечение отходов из баков хранения посредством откачивания и перемешивания; транспортировка извлеченных отходов в приемные баки с частичным использованием существующих трубопроводов; предварительная обработка отходов для приведения их характеристик в соответствие с требованиями последующих этапов технологического процесса; уменьшение объема: центрифугированием смол и перлитов (для корректировки влагосодержания отходов) и доупариванием КО; переработка и цементирование ЖРО; упаковка конечного продукта в бочки; выдержка бочек с конечным продуктом; упаковка бочек в транспортные упаковочные комплекты (ТУК) группами по четыре бочки; вывоз заполненных ТУК.

Завод рассчитан на переработку 2500 м<sup>3</sup>/год отходов, хранящихся в 14 баках, при сроке эксплуатации 10 лет. Отметим также, что разрешение на прием РАО от ЗПЖРО на СПХТРО временное, как и критерии приемки. Из 22 отсеков хранилища прием разрешен только в два (объем хранилища 71280 м<sup>3</sup>).

Технология ЗПЖРО ориентирована на кондиционирование отходов сложного состава. Специфика ЖРО обусловлена как отходами ЧАЭС, так и поступлениями из объекта «Укрытие» (в отходах присутствуют трансураниевые элементы, в большом количестве сульфаты, фосфаты, оксалаты, а также нефтепродукты, синтетические ПАВ, пленкообразующие материалы и органические вещества) [16].

В отличие от АЭС ВВЭР в ЖРО АЭС РБМК отсутствует борная кислота, а гетерогенные отходы содержат перлиты, которые обладают высокими абразивными свойствами. Наличие абразивов негативно сказывается на ресурсе движущихся элементов смесителя (это отмечено персоналом завода).

С технической точки зрения процессы цементирования на УО Ростовской АЭС и на ЗПЖРО ЧАС принципиально идентичны.

## Сравнительная оценка

Остановимся на вопросах, важных для принятия решения по выбору технологии цементирования и производственной системы обращения с ЖРО для украинских АЭС.

ЗПЖРО ЧАЭС и УО Ростовской АЭС - это производственные системы, имеющие разный уровень и масштабы реализации, разные технические и стратегические задачи (при одинаковой тактической задаче).

В целом технология ЗПЖРО – это масштаб завода, а технология Ростовской АЭС – это масштаб цеха.

Как бы ни был велик объем накопленных на ЧАЭС отходов и объем их поступлений в процессе ликвидации объекта и превращения зоны АЭС в экологически чистую систему, он имеет конечную величину. По оценке разработчика это 13 481,5 м<sup>3</sup> КО, 4059,7 м<sup>3</sup> пульпы отработанных ионообменных смол и 2 272,18 м<sup>3</sup> пульпы фильтроперлита. Эти отходы хранятся в ХЖО и ХЖТО. СП отсутствует. ЗПЖРО выполняет, практически, разовую задачу.

На функционирующих объектах ЖРО образуются и поступают постоянно, а потому срок действия системы кондиционирования ЖРО должен быть не менее срока жизненного цикла станции. Исходя из этого, важно оценить производительность технологии, исходя из динамики наработки ЖРО (по принципу разумной достаточности).

На ЗПЖРО готовый продукт отправляется на захоронение за территорию АЭС в границах чернобыльской зоны отчуждения. На Ростовской АЭС постройка на долговременное хранение осуществляется на промплощадке станции.

На ЗПЖРО реализуется бочечный принцип расфасовки продукта переработки с дальнейшим использованием ТУК как возвратной тары многоразового применения. На Ростовской АЭС заложен контейнерный принцип расфасовки, при котором контейнеры (НЗК) не возвращаются.

ЗПЖРО, создание которого растянулось на 15 лет, пока не имеет достаточной эксплуатационной статистики, которая имеется на Ростовской АЭС.

Большое значение имеет экономический аспект. На ЗПЖРО его специалистами выполнен «Экономический расчет эксплуатационных затрат для переработки ЖРО за один год с учетом технологических сред, электроэнергии и фонда оплаты труда с учетом захоронения в СОПХТРО, а также расчет себестоимости переработки 1 м<sup>3</sup> ЖРО за один год» (Гладнева Л. А.). Исходя из расчета по ценам 2012 г.:

стоимость захоронения (согласно письму ГСП «ЦПОРО» № 105/1509 от 28.12.2011) на I очереди комплекса «Вектор» (СОПХТРО) - 10 300 грн./м<sup>3</sup>;

себестоимость переработки 1 м<sup>3</sup> КО - 73 973,2 грн./м<sup>3</sup>;

себестоимость переработки 1 м<sup>3</sup> ионообменных смол - 139 846,8 грн./м<sup>3</sup>;

при совместном затворении гомогенных и гетерогенных отходов в цементную матрицу средняя цена 68 000 грн/м<sup>3</sup>. Отметим, что цементирование ЖРО (ионообменные смолы) в Словакии стоит 32 567 евро/м<sup>3</sup>, а захоронение – 112 000 евро/м<sup>3</sup> (данные 2013 г. с учетом цен на захоронение в Национальном хранилище РАО).

При проектной мощности ЗПЖРО 632,1 м<sup>3</sup> КО в год (2100 м<sup>3</sup> по конечному продукту) их кондиционирование и хранение за год будет стоить 46 758 870,98 грн. То же самое для гетерогенных отходов (ионообменные смолы) при проектной производительности завода 322,1 м<sup>3</sup> в год (2102 м<sup>3</sup> по конечному продукту) будет стоить 45 044 654,22 грн.

Ростовская АЭС таких расчетов не предоставляет.

## Заключение

Как отмечалось, приоритетным направлением оперативного решения проблемы кондиционирования ЖРО ОП НТЦ НАЭК «Энергоатом» выбрано цементирование [1]. В плане создания современной системы обращения с ЖРО на действующих АЭС Украины к системе цементирования предъявляется ряд требований:

1. Уровень реализации с учетом сокращения масштабов цементирования по мере внедрения комплекса обращения с ЖРО и автоматизации технологических процессов. Уровнями реализации могут быть: уровень технологической линии, уровень участка, уровень цеха и уровень завода. Необходимо искать оптимальный способ решения проблемы, на возможно более низком уровне.

2. Стратегическая гибкость. Это означает, что оборудование должно обеспечивать работу и с другими матричными материалами (например, геополимерами).
3. Tактическая гибкость, позволяющая в период опытно-промышленной эксплуатации опробовать различные варианты технологических процессов.
4. Адаптивность к уровню квалификации персонала объекта.
5. Мобильность ряда технических средств, их унификация в плане перспективной задачи создания гибкой мобильной технологии.
6. Максимальное использование стандартизированного оборудования.

Цементирование – реальный путь решения проблемы ЖРО отечественных АЭС уже сегодня. В то же время необходимо продолжить поиск более эффективных матричных материалов. Высокая стоимость кондиционирования и захоронения должны стимулировать работу по сокращению объема отходов. Задача следующего этапа – глубокая переработка КО [9].

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Андронов О.Б. О создании современной системы обращения с жидкими радиоактивными отходами на АЭС Украины. Постановка задачи // Проблемы безпеки атомних електростанцій і Чорнобиля. – 2015. – Вип. 24. – С. 32.
2. Анализ обращения с РАО при эксплуатации АЭС ГП НАЭК «Энергоатом», 2011. Отчет.
3. Никифоров А.С., Куличенко В.В., Жихарев М.И. Обезвреживание жидких радиоактивных отходов. – М.: Энергоиздат, 1985.
4. First mobile intermediate-level waste solidification plant // Nucl. Engng. Intern. – 2003. - Vol. 48, No. 589. - P. 12.
5. Cementation of radioactive waste. NUKEM Technologies GmbH. 2007.
6. Nucl. Waste News. - 2004.- Vol. 24, No 6.- P. 54; www.haaretz.com/ 2004. 28 Jun
7. Radwaste Solutions. - 2010. - Vol. 17, No. 5 (September/October)/ - P. 10; Hanford Press Releases, <http://www.hanford-vitplant.com/28.07.16.0.,2.10.2010>.
8. Hyun-Jun Jo et al. Commercialization Project of Ulchin.
9. Материалы заседания Совета заместителей главных инженеров ОП АЭС, к компетенции которых относятся вопросы обращения с РАО от 18.12. 2013.
10. ГОСТ 51883-2002. Отходы радиоактивные цементированные. Общие технические требования.
11. Итоговый отчет по контракту С-1/9/071, пакет работ «D-2». Определение рецептур конечного продукта ЗПЖРО. 12.12.2011.
12. Malinowski R., Slatkine A., Ben Yair M. Durability of Roman mortars and concretes for hydraulic structures at Caesarea and Tiberias // International Symp. on Durability of Concrete, Prague, Aug. 1961.- Prague, 1961. P. 1 - 14.
13. Malinowski R. Betontechnische Problemlosung bei antiken Wassebauten // Leichtweiss Institut. - Mitteilugen: Braunchweig, 1979. - Vol. 64. - P. 7 - 12.
14. Критерії приймання радіоактивних відходів на захоронення в спеціально обладнаному приповерхневому сховищі твердих радіоактивних відходів (СОПСТРВ). Перший етап експлуатації СОПСТРВ. Приймання РАВ від ЗПРВ та ЗПТРВ ЧАЕС для захоронення в два симетричних відсіки СОПСТРВ. Редакція 5. 2009. - 36 с.
15. Открытое акционерное общество «Свердловский научно-исследовательский институт химического машиностроения». Установка цементирования.
16. Програма обращения с радиоактивными отходами на «Объекте «Укрытие».

**О. Б. Андронов, В. М. Безмилов**

*Институт проблем безпеки НАН України, вул. Кірова, 36а, Чорнобиль, 07270, Україна*

#### **ПРО СТВОРЕННЯ СУЧАСНОЇ СИСТЕМИ ПОВОДЖЕННЯ З РІДКИМИ РАДІОАКТИВНИМИ ВІДХОДАМИ НА АЕС УКРАЇНИ. КОНДИЦІОНУВАННЯ РІДКИХ РАДІОАКТИВНИХ ВІДХОДІВ**

Розглядаються підходи до створення технологічної системи включення рідких радіоактивних відходів (РРВ) у тверду матрицю з отриманням кінцевого продукту, що відповідає вимогам захоронення. Оперативне вирішення цього питання дасть змогу зняти гостроту проблеми накопичення РРВ на АЕС України [1], завершити цикл поводження з рідкими відходами та сконцентрувати потенціал галузі на пошуку й впровадженні сучасного комплексу поводження як з рідкими відходами, так і з радіоактивно забрудненими водами в цілому.

*Ключові слова:* цементування, включення в полімінеральну матрицю, гнучка технологія, аналіз закордонного досвіду, прийняті рішення.

**O. B. Andronov, V. M. Bezmylov**

*Institute for Safety Problems of Nuclear Power Plants NAS of Ukraine, Kirova str., 36a, Chornobyl, 07270, Ukraine*

**OF CREATION OF UP-TO-DATE SYSTEM FOR TREATMENT OF LIQUID RADIOACTIVE WASTE AT UKRAINIAN NPP. CONDITIONING OF LIQUID RADIOACTIVE WASTES**

The approaches are considered concerning the creation of technology system for insertion of liquid radioactive wastes (LRW) in solid matrix with obtaining the end product, which must meet the final disposal requirements. Operative decision of this will allow removing acuteness of LRW accumulation problem at the operating NPPs of Ukraine [1], completing the cycle of liquid waste treatment and concentrating the branch's potential at search and implementation of up-to-date complex for treatment of the both liquid wastes and radioactively contaminated water as the whole.

*Keywords:* cementing, insertion in polymineral matrix, flexible technology, analysis of foreign experience, adopted decisions.

REFERENCE

1. *Andronov O.B.* Of creation of up-to-date system for treatment of liquid radioactive wastes at Ukrainian NPPs. Statement of problem // *Problemy bezpeky atomnyh electrostantsiy i Chornobylya (Problems of Nuclear Power Plants' Safety and of Chornobyl)*. - 2015 – Iss. 24 – P. 32. (Rus)
2. *Analysis of RAW management during operation of NPPs of SE NNGC «Energoatom»*, 2011. Report. (Rus)
3. *Nikiforov A.S., Kulichenko V.V., Zhikharev M.I.* Sterilization of liquid radioactive wastes. – Moskva: Energoizdat, 1985. (Rus)
4. *First mobile intermediate-level waste solidification plant* // *Nucl. Engng. Intern.* – 2003. - Vol. 48, No. 589.- P. 12.
5. *Cementation of radioactive waste*. NUKEM Technologies GmbH. 2007.
6. *Nucl. Waste News.* – 2004. Vol. 24, No 6. P. 54. [www.haaretz.com](http://www.haaretz.com) / 2004. 28 Jun.
7. *Radwaste Solutions.* – 2010. - Vol. 17, No. 5 (September/October) P. 10; Hanford Press Releases, [http://www.hanford-vitplant.com/28.07, 16.09, 2.10.2010](http://www.hanford-vitplant.com/28.07,16.09,2.10.2010).
8. *Hyun-Jun Jo et al.* Commercialization Project of Ulchin.
9. *Materials of session of Council of deputies to chief engineers of SE NPPs, to whose competence epy RAW management issues pertain, dated 18.12. 2013.* (Rus)
10. *GOST 51883-2002.* Waste radioactive cemented. General technical requirements. (Rus)
11. *Final report for contract C-1/9/071, «D-2» work package. Determination of end product formulae for LRWTP.* 12.12.2011. (Rus)
12. *Malinowski R., Slatkine A., Ben Yair M.* Durability of Roman mortars and concretes for hydraulic structures at Caesarea and Tiberias // *International Symp. on Durability of Concrete, Prague, Aug. 1961.- Prague, 1961.- P. 1 - 14.*
13. *Malinowski R.* Betontechnische Problemlösung bei antiken Wasserbauten // *Leichtweiss-Institut. - Mitteilungsang:* Braunschweig, 1979. - Vol. 64. - P. 7 - 12.
14. *Criteria for acceptance of radioactive waste for burial in specially equipped surface repository for solid radwaste (SESRSRW).* First stage of SESRSRW operation. Reception of RAW from PMRAW and PMSRW of ChNPP for burial in two symmetric departments of SESRSRW. Edition 5. 2009. -36 p. (Ukr)
15. *Opened joint stock society «Sverdlov research & development institute for chemical machine building».* Cementing plant. (Rus)
16. *Program of radwaste management at «Shelter Object».* (Rus)

Надійшла 20.07.2015

Received 20.07.2015