

ПРОБЛЕМЫ ОБРАЩЕНИЯ С ЖИДКИМИ РАДИОАКТИВНЫМИ ОТХОДАМИ В ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЯХ

О. Б. Андронов, А. А. Ключников, О. Л. Стрихарь, В. Н. Щербин

Институт проблем безопасности АЭС НАН Украины, Чернобыль

Оценивается ситуация в сфере обращения с жидкими радиоактивными отходами после Кыштымской и Чернобыльской аварий и дается информация о новом инженерном направлении в решении стабилизационных задач – гибкой технологии.

Прошло 20 лет после трагической аварии на 4-м энергоблоке ЧАЭС. В техническом плане страна оказалась не готовой к решению проблем, связанных с ликвидацией последствий запроектной аварии на атомном объекте (авария 7-го уровня согласно международной шкале), и, в частности, с проблемой дезактивации радиоактивно загрязненных вод и жидких радиоактивных отходов (ЖРО).

20 лет стабилизационных работ приблизили нас к пониманию необходимости создания специальных технических средств и технологий, способных оперативно решать ситуативные и тактические задачи в условиях аварийного объекта.

В вопросах обращения с жидкими отходами, вероятно, что-то можно было предусмотреть, опираясь на опыт проведения масштабных аварийных работ в Кыштыме. Этого, к сожалению, не произошло.

С п р а в к а. 29 сентября 1957 г. в 16 ч 20 мин по местному времени на Южном Урале, на радиохимическом заводе по выделению плутония (п/я 40), который за рубежом получил название «Кыштымский ядерный комплекс» (один из первых центров атомной промышленности СССР), произошел взрыв емкости-хранилища высокоактивных отходов (ВАО). Емкость содержала примерно 80 т высокоактивного раствора и находилась в бетонном каньоне на глубине 8,2 м под бетонной плитой. Взрыв полностью разрушил емкость, сорвал и отбросил на 25 м бетонную плиту перекрытия каньона. Из 20 МКи активности, хранившихся в емкости, примерно 2 МКи было поднято в воздух на высоту 1 км. Остальная активность была разбросана вблизи емкости. Образовавшееся радиоактивное облако, которое перемещалось в северо-восточном направлении, обусловило радиоактивное загрязнение части Челябинской, Свердловской и Тюменской областей. Загрязненная территория впоследствии получила название «Восточно-уральский радиоактивный след» (ВУРС). Рассеянная при взрыве смесь радиоактивных продуктов содержала ^{89}Sr , $^{90}\text{Sr}+^{90}\text{Y}$, $^{95}\text{Zr}+^{95}\text{Nb}$, $^{106}\text{Ru}+^{106}\text{Rh}$, ^{137}Cs , $^{144}\text{Ce}+^{144}\text{Pr}$, ^{147}Pm , ^{155}Eu , Pu (смесь изотопов).

Данное событие квалифицируется как «серьезная авария» (6-й уровень согласно международной шкале).

Имеются сведения о том, что в ликвидации последствий аварии на объекте принимал участие практически весь персонал предприятия, а в экологических мероприятиях – население города.

Жесткий режим секретности был, вероятно, одной из причин того, что официально об аварии было сказано только летом 1989 г. с трибуны сессии Верховного Совета СССР (т.е. через 32 года после события и через три года после Чернобыля). До сих пор ощущается дефицит технических сведений и информации о практических инженерных решениях при проведении дезактивационных работ, обращении с продуктами дезактивации и ЖРО в целом на аварийном объекте. Это, по сути, не позволяет и сейчас в полной мере воспользоваться опытом Кыштыма для решения сходных задач на 4-м энергоблоке ЧАЭС. Другими словами, опыт ликвидации последствий аварии не смог стать разумной основой формирования технического мировоззрения при решении специфических проблем и, в том числе, проблем обращения с жидкими радиоактивными и токсичными отходами в чрезвычайных ситуациях.

Аварии в Кыштыме и Чернобыле подсказывают, что необходимо иметь автономные, мобильные технические средства оперативного вмешательства, способные работать в режиме быстрого реагирования и в независимости от специфики объекта и условий применения.

С позиций сегодняшнего дня многие решения по обращению с жидкими отходами кажутся недостаточно продуманными. Полное понимание всей сложности и значимости проблемы обращения с ЖРО приходит только сегодня. Так, в документе «Загальнодержавна програма зняття з експлуатації Чорнобильської АЕС і перетворення об'єкта "Укриття" в екологічно безпечну систему» отмечена необходимость создания специальных мобильных средств обращения с ЖРО.

В определенной мере такой постановке задачи способствовали позитивные результаты работ в данном направлении, проводимых в ИПБ АЭС НАН Украины с 1996 г. Цель работы – создание гибкой технологии обезвреживания жидких отходов широкого диапазона применения.

По начальным результатам НИР в 1997 - 1999 г. были разработаны, реализованы, испытаны и сданы в опытную эксплуатацию на объекте «Укрытие» экспериментальные образцы ряда технических средств в мобильном исполнении. Это модуль предварительной очистки жидких отходов сложного состава от урана и трансурановых элементов, модуль-концентратор вторичных гетерогенных отходов, модуль-утилизатор, комплект специальных устройств для отбора жидких, диспергированных отходов из мелких скоплений, рассредоточенных в труднодоступных местах с высоким уровнем радиации.

Указанное оборудование может быть включено в систему обращения с ЖРО при выполнении работ по снятию ЧАЭС с эксплуатации.

Гибкая технология (аналог гибких производств) в рассматриваемом формате – это техническая реализация операционной системы, отвечающей определенным требованиям. В виде концептуальных положений эти требования следующие:

1. Структура – операционная, состоящая из набора функциональных элементов, каждый из которых выполняет свою операцию. Дублирование функций исключается.

2. Функциональная единица – операционный элемент (оператор), название которого определяется выполняемой им функцией в операционной системе.

3. Технологическая единица – модуль, модуль-трансформер, блок. Это технически реализуемый оператор.

4. Технология – гибкая, способная оперативно адаптироваться к условиям применения.

5. Технологическая линия – модульная цепочка, выстроенная в последовательности под решаемую задачу. Принцип – каждый предыдущий модуль готовит оптимальные условия работы последующему.

6. Модуль – это самодостаточный технологический элемент с унифицированными внешними связями, работающий на одном методе обращения с отходами и в диапазоне характеристик, где достигается наивысшая эффективность частной операции. Основные конструктивные требования к модулю – компактность, разумно-минимальное значение отношения массы изделия к производительности.

7. Организационное обеспечение должно предусматривать группу (подразделение) обслуживания, владельца технических средств, организацию их хранения, ремонта, модернизации, пополнения новыми образцами оборудования и т.п.

8. Информационное обеспечение. Является главным атрибутом, обуславливающим гибкость технологии и включает в себя две базы данных (БД):

БД-1 (материальная) – содержит сведения о фильтрующих, мембранных, сорбционных материалах и сорбентах, их физических, геометрических, гидравлических и кинетических характеристиках, а также стоимостных показателях;

БД-2 (технологическая) – содержит полные сведения по техническим средствам модульного комплекта, приоритетных режимах их использования.

9. Техническое обеспечение. Предусматривает создание специальных модульных технических средств в мобильном исполнении, образующих штатный комплект оборудования. Сюда входят также блок питания, блок контроля и блок управления (единые для всей технологической линии).

10. Инженерное обеспечение. Предусматривает возможность использования инженерных сетей и коммуникаций объекта применения технологии.

11. Сфера применения технологии и ее технические возможности: является рабочим инструментом системы быстрого реагирования (главная функция), инструментом оперативного вмешательства при реализации мероприятий по обращению с ЖРО;

эксплуатационная поддержка на активных этапах жизненного цикла энергоблока (ЭБ) с целью минимизации ЖРО;

техническая поддержка при реализации экстренных мер безопасности при превышении проектных пределов безопасной эксплуатации АЭС и ликвидации возможных негативных последствий;

техническая поддержка и практическое участие в реализации мероприятий по продлению срока эксплуатации энергоблоков, связанных с освобождением хранилищ жидких отходов; следует отметить, что продление ресурса АЭС в настоящее время является актуальной задачей, решению которой НАЭК «Энергоатом» Украины уделяет большое внимание;

решение локальных проблем, связанных с очисткой возможных несанкционированных сбросов радиоактивных техногенных вод и ЖРО.

12. Транспортабельность должна обеспечиваться мобильностью всех технических средств, возможностью их ручного перемещения в рабочей зоне. Масса единичного элемента не должна превышать 60 кг.

13. Самодостаточность означает способность технологии самостоятельно, в автономном режиме, обеспечивать выполнение всех операций в заданной последовательности: отбор раствора → предварительная обработка → предочистка → основная очистка → кондиционирование → утилизация вторичных отходов. В узком диапазоне использования, когда проблема решается с помощью одной – двух операций, важным показателем эксплуатационной пригодности операционной системы является самодостаточность каждого оператора в отдельности.

14. Энергопитание:

а) основной вид – электроэнергия. В комплект стандартизированного оборудования включается собственный электрогенератор;

б) модули – термоконцентраторы (дистилляторы) должны ориентироваться на потенциальную возможность использования природного газа (метана), баллонного газа (пропан-бутан), тепловых отходов горячих производств, жидкого топлива.

15. Базирование технических средств. Технические средства гибкой технологии, т.е. все оборудование операционной системы не может входить в штатный комплект оборудования АЭС и должно храниться на расстоянии от объекта, исключающем негативные воздействия в случае любой аварии, и быть в постоянной готовности к использованию.

Приведенные концептуальные положения в целом характеризуют как техническую идеологию системы, так и направления инженерных решений. Эффективность работы системы в первую очередь зависит от корректности ее формирования, которое осуществляется на основе входных данных. Входные данные устанавливаются с помощью технологического тестирования основного метода на натурном растворе. Для этой цели проводится его полный радиохимический и физический анализ. На основании результатов физического анализа выбирается способ и оборудование предварительной очистки (из соответствующих баз данных). Таким же образом по результатам радиохимического анализа предварительно отбираются необходимые сорбенты, исходя из их кинетических характеристик. Тестируется каждый сорбент в отдельности и определяются сорбционный коэффициент и сорбционная ем-

кость, по которым рассчитывается селективность (диаграмма селективности). По диаграммам селективности формируется композиционный состав смеси сорбентов или долевое их количество при раздельной загрузке. Исходя из физико-механических характеристик сорбционного материала, выбирается технология и режим его использования. Рассчитывается динамика процесса очистки, т.е. зависимость объемной скорости потока адсорбата от времени процесса. Методика таких расчетов разработана.

Структурная схема реализации операционной системы представлена на рис. 1.



Рис.1. Схема гибкой технологии и ее обеспечения.

Настоящая статья не ставит целью подробное изложение способов реализации концептуальных требований. Следует отметить, что в рассматриваемой технологии могут найти применение большинство известных и проверенных мировой практикой методов очистки от радионуклидов поликомпонентных растворов. Условиями применимости являются простота метода, экономическая целесообразность и возможность его адаптации к форсированному режиму динамической очистки, а также модульному конструктивному исполнению.

Вместе с тем есть необходимость более детально остановиться на методах очистки ЖРО, которые в гибкой технологии являются основными. Это сорбция и термоконцентрирование (дистилляция). В настоящее время оба указанные метода успешно применяются в мировой атомной энергетике в качестве основных, причем сорбционные технологии преобладают везде, где позволяют условия.

Главное преимущество сорбции – возможность селективного отбора радионуклидов из сложных растворов. По данному показателю достойной альтернативы селективной сорбции пока нет.

О стабильном интересе у нас и за рубежом к сорбционным технологиям свидетельствуют многочисленные публикации и интенсивность патентования. Активная научно-исследовательская работа в этой области привела к появлению высокоэффективных селективных сорбентов нового поколения, модифицированных сорбентов на основе природных минералов. К сожалению, реализация большинства из них в динамических условиях на су-

существующем фильтрационном оборудовании невозможна. Причина - низкая механическая прочность, мелкофракционность, склонность к образованию плотных водозапорных глиноподобных масс и т.п. Попытки гранулирования с целью адаптации к насыпным фильтрам снижают их сорбционную емкость и лишают важного преимущества – малоотходности. Например, в практикуемых так называемых тонкопленочных сорбентах (активное вещество наносится тонкой пленкой на прочную матричную основу) доля активного вещества не превышает 10 % объема сорбционного материала, т.е. 90 % материала – пустая транзитная порода, которая попадает в гетерогенные отходы. Намывные фильтры в чистом виде также не способны качественно решать проблему (нельзя до бесконечности уменьшать щелевой зазор в перфорации рабочей части фильтрующего элемента). Назрела потребность разработать технологические средства под сорбент, а не приспособливать (как сейчас) сорбент под морально устаревшие технические средства.

По сути конструкция практически всего сорбционного оборудования была заимствована из традиционных производств (теплоэнергетика, опреснительная техника). В настоящее время очевидным стал факт существенного разрыва между темпами разработок новых сорбентов и динамикой развития технических средств, их эффективной реализации. Такое сложившееся ненормальное положение сдерживает создание новых, высокопродуктивных технологий в сфере обращения с жидкими отходами вредных производств в целом и предприятий атомной энергетики в частности.

В решении задачи создания технической базы гибкой технологии важная роль отводится исследованиям, необходимым для разработки сорбционного модуля. Сорбционный оператор – базовая основа сорбционной технологии. Проведенные работы в данном направлении позволили найти достаточно простое техническое решение, обеспечивающее применение сорбентов в динамическом режиме организации процесса независимо от их физико-механических и геометрических характеристик. В сорбционном модуле режим протока характеризуется переменным расходом адсорбата. Алгоритм изменения объемной скорости потока задается кинетической кривой. Данное нововведение позволяет повысить производительность операции очистки и при этом обеспечить форсированный режим рабочего процесса.

Следует заметить, что сорбция – понятие широкое (адгезия, окклюзия, сокристаллизация, физическая сорбция, хемосорбция и т.д.), поэтому процесс ассоциирования радионуклидов на твердой фазе не сводится только к хемосорбции, которая для идеальных условий описывается известными изотермами адсорбции. Для построения реальной кинетической кривой на реальном исходном растворе служит блок технологического тестирования (одна из его функций), о чем уже говорилось.

Экспериментально подтверждена целесообразность введения промежуточного концентрирования очищаемой среды с целью достижения наиболее полной выработки сорбционной емкости сорбента без увеличения времени сорбции.

Концентрирование раствора после начальной стадии сорбционной очистки повышает эффективность очистки на последующей стадии, что следует из изотермы адсорбции. Подробности процесса в настоящей статье не приводятся (это тема специальной публикации).

Для промежуточного концентрирования можно использовать мембранный или термический метод (в зависимости от задачи и условий).

Термоконцентрирование, как один из основных методов обращения с жидкими отходами, который широко применяется в мировой практике на предприятиях ядерного топливного цикла и атомной энергетики, технически реализуется на выпарных аппаратах, где в качестве энергоносителя применяется пар низких параметров. Тепло греющего пара передается через стенки конвективного трубного пучка к раствору. Такой способ теплопередачи, свойственный котлам и прочим теплообменным аппаратам с разделительной стенкой, в техническом плане уже достиг такого уровня, когда материальные затраты на усовершенствования не оправдываются получаемым позитивным эффектом.

В ИПБ АЭС НАН Украины проведены исследования альтернативного низкотемпературного метода термоконцентрирования (температура процесса ниже температуры кипения) с помощью контактных аппаратов прямой теплопередачи от греющего агента к раствору, без разделительной стенки. Проанализирована возможность адаптирования таких аппаратов к гибкой технологии. Результаты аналитической оценки дают основание считать применение контактных аппаратов с погружным нагревателем весьма перспективным, особенно в сложных условиях аварийного объекта, когда нет пара и разрушены инженерные сети, и в полевых условиях. Для дальнейших подробных исследований особый интерес представляет оператор-термоконцентратор с петлевым рабочим циклом. Структурная схема термического модуля представлена на рис. 2.

Применение контактного аппарата, работающего на углекислом газе в качестве греющего агента и без разделительных стенок между греющим агентом и раствором снимает проблему инкрустации солями рабочих поверхностей и повышает термический к.п.д. по сравнению с паровыми аппаратами на 10 – 15 %. Рабочая температура процесса – 70 – 85 °С.

Если рассматривать реальный физический состав ЖРО АЭС, то следует обратить внимание на тот факт, что значительное их количество имеет развитую дисперсную фазу, а то и просто насыщена грязевыми отложениями, шламами, различного рода механическими включениями, волокнами, пленочными материалами. В твердой фазе таких отходов ассоциирована, как правило, большая часть радионуклидов. В гибкой технологии это обстоятельство учтено.

Рассматривая сферу применения гибкой технологии нельзя обойти вниманием, особый момент в жизни АЭС – продление срока эксплуатации энергоблоков, о котором уже упоминалось. Он не вошел в офици-

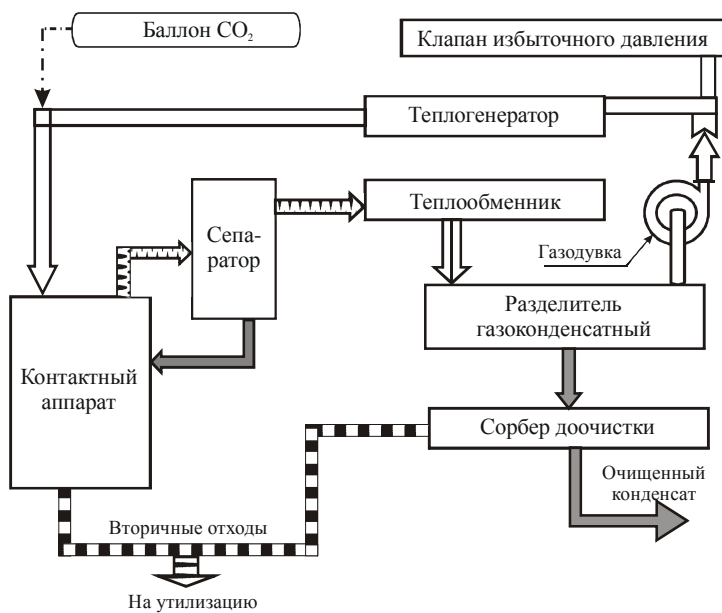


Рис. 2. Схема термического модуля, работающего на углекислом газе в петлевом режиме.

альный перечень этапов жизненного цикла атомной энергетической установки. Вместе с тем проблемы, связанные с ним, в настоящее время являются предметом активного обсуждения. В отрасли создаются или уже созданы специальные структуры, занимающиеся данным вопросом.

Если говорить о ЖРО, накопленных и поступающих, то встает проблема достаточности проектного объема стационарных хранилищ (ХЖО, ХЖТО), который рассчитывался в свое время под проектные сроки эксплуатации объекта.

По ряду причин технического порядка темпы утилизации отходов, т.е. освобождения хранилищ, отстают от динамики их пополнения.

Экономические реалии настоящего времени не позволяют возле

каждой АЭС строить завод по переработке РАО и могильники (да и целесообразность подобного решения сомнительна). Транспортировка же отходов в места централизованного сбора и переработки - задача сложная и неоднозначная в организационно-техническом и правовом плане, а также в плане учета общественного мнения. Пока таким местом может быть зона ЧАЭС с сооружаемыми здесь спецобъектами.

Гибкая технология, ее инженерные возможности могли бы внести позитивный вклад в решение проблемы переработки и утилизации жидких отходов непосредственно на объекте, их производящем.

Рассмотренная операционная система (гибкая технология) по характеру выполняемых функций согласно ОПБ АЭС 2000 формально не является системой безопасности. Однако этот лишь вопрос классификации. С помощью операционной системы обеспечивается возможность вмешательства в радиационно-опасную технологию обращения со сложными, радиоактивными растворами в любой, даже чрезвычайной ситуации, когда технические средства и барьеры безопасности могут быть деструктурированы или полностью разрушены. В данном случае операционная система выполняет свои функции как элемент глубоко эшелонированной защиты (4-й уровень согласно ОПБ АЭС 2000, а именно возвращение АЭС в контролируемое состояние, удержание радиоактивных веществ в установленных границах).

Существующую на украинских АЭС систему обращения с жидкими отходами можно улучшить, не прибегая к перепроектированию, к дорогим реконструкциям или широкому техническому перевооружению. В этом существенную роль могут сыграть новые, современные технические средства (операционные элементы), создающиеся для гибкой технологии. На рис. 3 и 4 представлены принципиальные схемы обращения с ЖРО отечественных АЭС, на рис. 5 – концептуальная схема обращения с ЖРО с использованием элементов гибкой технологии.

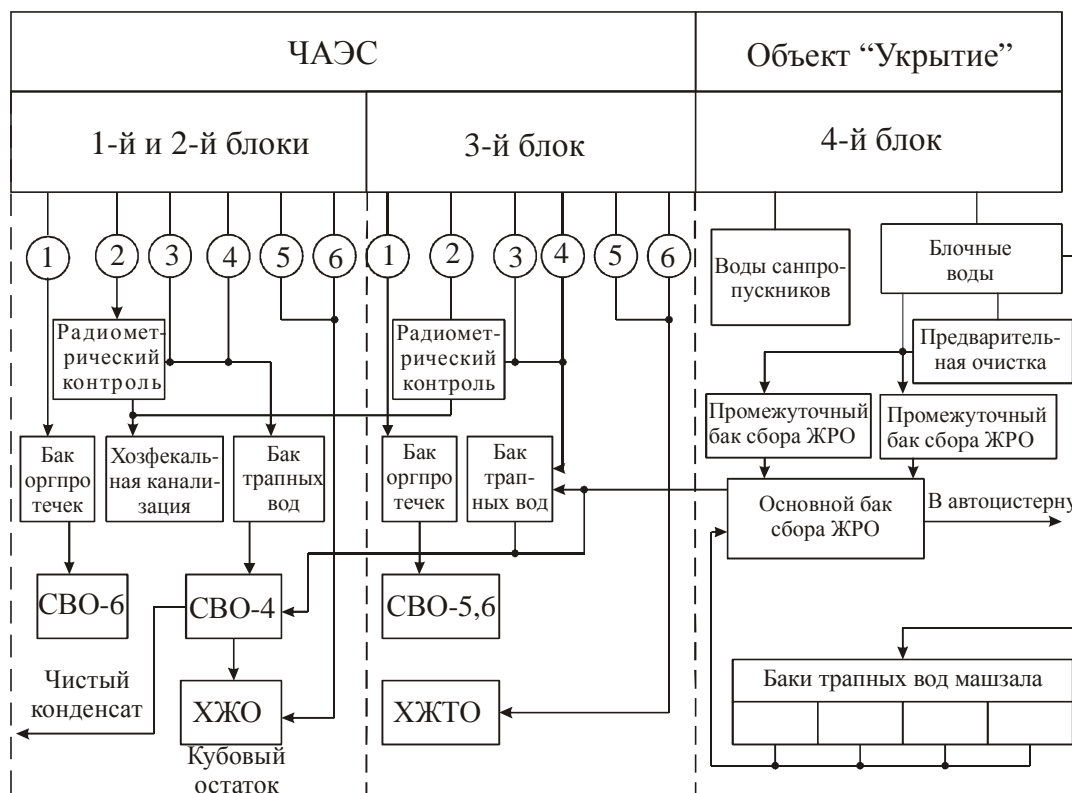


Рис. 3. Схема связей элементов системы обращения с ЖРО ЧАЭС по состоянию на 2004 г.:

- 1 – оргпротечки; 2 – вода душевых и спецпрачечных; 3 – трапные воды;
4 – регенерационные растворы; 5 – перлиты; 6 – иониты.

В заключение стоит отметить, что концепции технологий обращения с ЖРО на отечественных и зарубежных АЭС различаются исходными принципами, на основе которых строятся типовые схемы обработки и переработки радиоактивно загрязненных вод. Если у нас все жидкие отходы подразделяются на две группы - гетерогенные (пульпы фильтрующих материалов, сорбентов) и гомогенные, то в США, например, на АЭС с реакторами BWR и PWR

(корпусные реакторы) переработка отходов осуществляется по иным схемам. Согласно им все гомогенные отходы разделены на четыре группы. Первая группа – бессолевые отходы (организованные протечки, воды взрыхления ионообменных фильтров); вторая группа – трапные воды (термин “трапные воды” в зарубежной практике имеет более узкий смысл, поскольку в это понятие включаются в основном неорганизованные протечки и технологические сливы); третья группа – солевые отходы (регенераты, растворы от дезактивации, лабораторные воды); четвертая группа – отходы, содержащие детергенты (прачечные воды и др.). Цель такого разделения – сокращение конечных продуктов переработки (утилизации), т.е. собственно отходов АЭС за счет сокращения масштабов упаривания и замены его (где возможно) другими методами, предотвращение загрязнения всех отходов детергентами, отравляющими сорбент при ионировании. Обе концепции не идеальны, если их рассматривать не только с технической, но и экономической точки зрения. Со временем мировая практика внесла существенные коррективы в подходы к решению проблем обращения с ЖРО. Появилась потребность в сближении зарубежной и отечественной технологий, оптимизации процесса обращения с ЖРО по техническим и экономическим критериям. При этом остается главное требование – минимизация РАО (уменьшение показателя отходности Т/Мвт·год – важная и актуальная задача отечественных АЭС).



Рис. 4. Принципиальная схема связей спецводоочистки Южно-Украинской АЭС: РО – реакторное отделение; БМ – блок мастерских; СББ – санитарно-бытовой блок; ВА – выпарные аппараты; КИП – контрольно-измерительные приборы.

Несвоевременность и недостаточность технической информации о Кыштымском событии, запоздалое внимание к формированию нового технического мировоззрения и инже-

нерной мысли на опыте ошибок в постчернобыльский период в вопросах обращения с РАО отодвинули по времени идею создания новых, отечественных технологий обращения с отходами.

И все же растущее понимание необходимости проведения научно-исследовательских и специальных конструкторских работ по созданию средств противодействия последствиям событий в особых и чрезвычайных ситуациях внушает оптимизм.

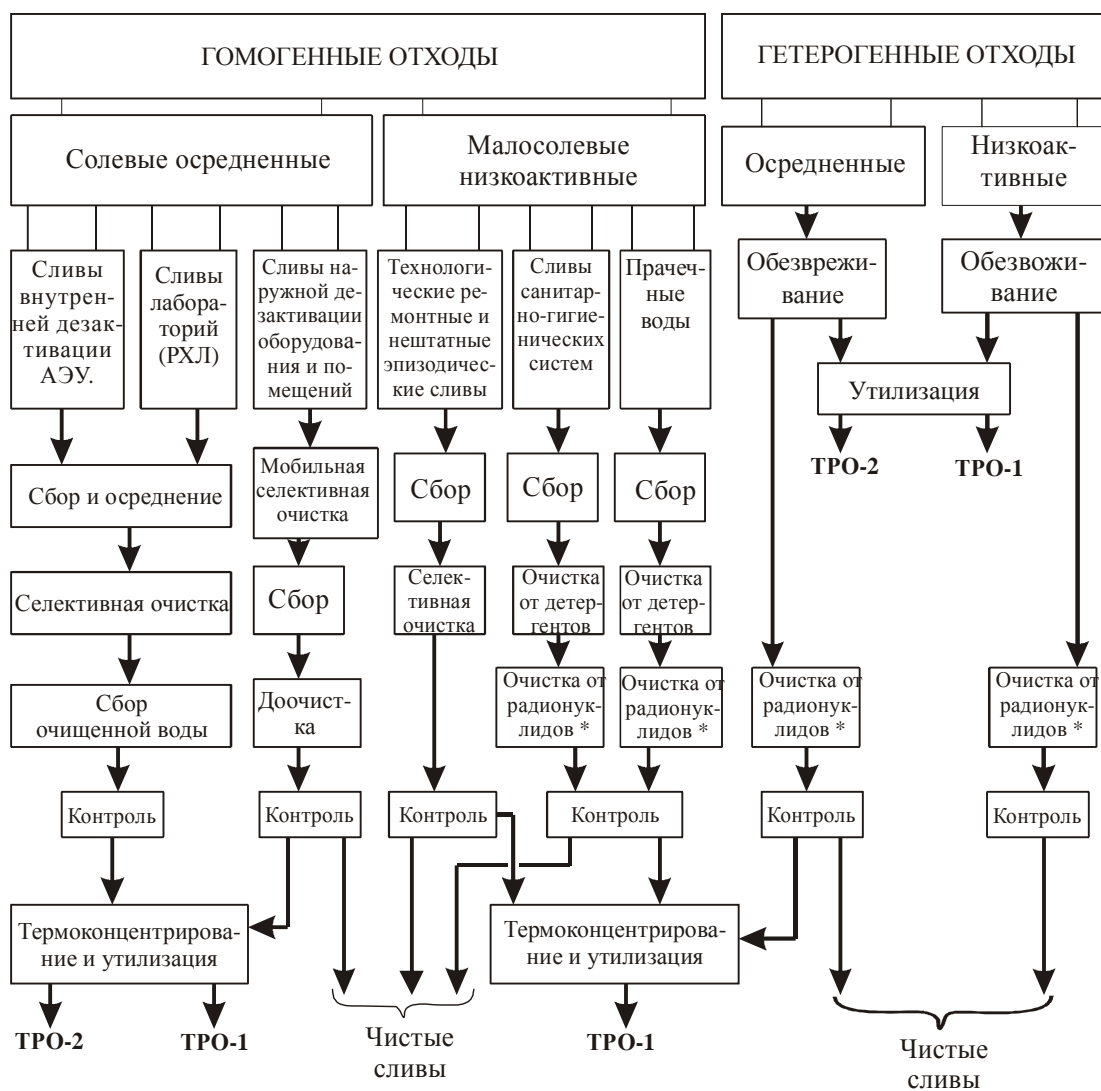


Рис. 5. Концептуальная схема обращения с ЖРО.

Поступила в редакцию 28.02.06

11 ПРОБЛЕМИ ПОВОДЖЕННЯ З РІДКИМИ РАДІОАКТИВНИМИ ВІДХОДАМИ В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

О. Б. Андронов, О. О. Ключников, О. Л. Стріхар, В. М. Щербін

Оцінюється ситуація у сфері поводження з рідкими радіоактивними відходами після Киштимської і Чорнобильської аварій і дається інформація про новий інженерний напрям у рішенні стабілізаційних задач – гнучкій технології.

11 PROBLEMS OF LIQUID RADWASTE TREATMENT IN EXTRAORDINARY SITUATIONS

O. B. Andronov, O. O. Klyuchnikov, O. L. Strikhar, V. M. Shcherbin

Situation in liquid radwaste management after Kyshtym and Chernobyl accidents is assessed, and information on new engineering branch – flexible technologies- in resolving stabilization task is delivered.