

Обращение с радиоактивными отходами на атомных электростанциях

Рассматриваются виды отходов низкой и средней активности и способы обращения с ними

В.М. Ефременков

Во многих странах атомная энергетика является существенной частью национальной энергосистемы. Она конкурентоспособна в экономическом плане и чиста экологически по сравнению с большинством других видов энергии, используемых для производства электричества. Вместе с ними атомная энергетика обеспечивает национальное электроснабжение. Очевидно, что для сохранения достигнутого в промышленных странах уровня жизни и для удовлетворения энергетических потребностей в развивающихся странах необходимо дальнейшее увеличение доли ядерной энергии в национальном энергоснабжении.

В результате эксплуатации ядерных реакторов образуются радиоактивные отходы. Но их количество значительно меньше, чем количество отходов от электростанций, работающих на угле (см. таблицу). Отходы атомных электростанций (АЭС) имеют низкую активность, а содержащиеся в них, в основном, короткоживущие радионуклиды обладают небольшой радиотоксичностью. Но из всех ядерных установок атомные электростанции – самые многочисленные, и на них приходится наибольшее количество радиоактивных отходов.

Характер и количество получаемых на АЭС отходов зависит от типа реактора, его конструктивных особенностей, условий его эксплуатации и целостности топлива. Радиоактивные отходы станции включают в себя активированные радиоизотопы от конструкционных материалов, замедлителя и охладителя; продукты коррозии и загрязнения продуктами деления от топлива. Методы обработки и кондиционирования отходов АЭС достигли в настоящее время высокого уровня эффективности и надежности и продолжают совершенствоваться в целях повышения безопасности и экономичности всей системы обращения с отходами.

Отходы атомных электростанций

Радиоактивные отходы низкой и средней активности (ОНСА) получают на АЭС в результате загрязнения различных материалов радионуклидами,



На атомной электростанции Ловиза в Финляндии некоторые виды радиоактивных отходов уплотняются с помощью гидравлического пресса. (Предоставлено YJT, Финляндия)

Сравнение электростанций, работающих на угле, с атомными электростанциями, производящими то же количество электроэнергии

| | Электростанция, работающая на угле | Атомная электростанция |
|--|------------------------------------|------------------------|
| Топливо, требуемое на год | 3 000 000 м ³ | 3 м ³ |
| Образующиеся отходы | 400 000 м ³ | 1000 м ^{3*} |
| Количество токсичных металлов в образующихся отходах | 3 000 м ³ | 1 м ³ |

Источник: Nuclear Power and Fuel Cycle: Status and Trends, IAEA (1989).
*Включаются отходы, образующиеся при производстве топлива и переработке.

Г-н Ефременков – старший сотрудник Отдела ядерного топливного цикла и обращения с отходами.

образующимися при делении и активации в реакторе, или выбрасываемыми топливом и поверхностью покрытий. Радионуклиды выбрасываются и аккумулируются, в основном, в системе охлаждения реактора и в меньшей степени – в бассейне для хранения отработавшего топлива.

Основные отходы, образующиеся при эксплуатации атомной электростанции, составляют компоненты, удаляемые при перегрузке топлива или ремонте (главным образом активированные твердые вещества, например, нержавеющая сталь, содержащая кобальт-60 и никель-63), и эксплуатационные отходы, к которым относятся радиоактивные жидкости, фильтры и ионообменные смолы, загрязняемые продуктами деления из контуров с жидким охладителем.

В целях уменьшения количества отходов для промежуточного хранения и сокращения стоимости захоронения все страны прилагают усилия по уменьшению, где это возможно, объема образующихся отходов. Сокращение объема особенно привлекательно в отношении низкоактивных отходов, имеющих, как правило, крупные объемы и небольшую активность излучения. Существенные усовершенствования возможны с помощью административных мер (замена бумажных полотенец сушильными аппаратами, введение повторно используемой прочной защитной одежды и др.) и путем общего улучшения условий работы.

Жидкие и влажные твердые отходы

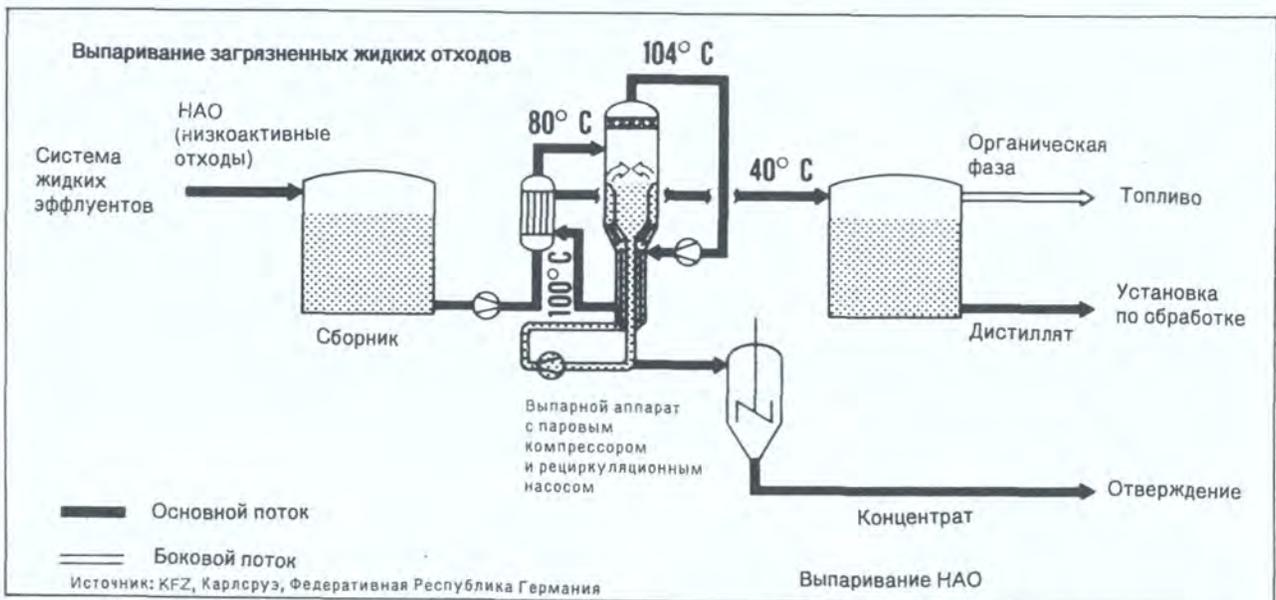
Различные типы коммерческих реакторов, действующих в настоящее время во всем мире, образуют различные виды отходов. Они отличаются как по активности, так и по объему образующихся жидких отходов. Реакторы, охлаждаемые и замедляемые водой, создают больше жидких отходов, чем реакторы, охлаждаемые газом. Объем жидких отходов в реакторах с кипящей водой (BWR) значительно больше, чем в реакторах с водой под давлением (PWR). Поскольку очистительная система тяжеловодных реакторов (HWR) работает, в основном, с

применением прямоточной ионообменной технологии для рециклирования тяжелой воды, естественно, в них не образуются жидкие концентраты.

Активные жидкие отходы получаются в результате очистки охладителя первых контуров (PWR, BWR), бассейна хранения отработавшего топлива, стоков, промывочной воды и фильтрационных вод. Операции по очистке реакторов также влекут за собой образование жидких отходов, связанное, главным образом, с ремонтными работами по трубопроводам и оборудованию. Очистные отходы включают в себя грубые (продукты коррозии) и различные органические вещества, такие как щавелевая и лимонная кислоты.

Другая категория отходов, образующихся на АЭС, – влажные твердые вещества. К ним относятся различного рода отработавшие ионообменные смолы, фильтрующие среды и шламы. Отработавшие смолы составляют наибольшую часть влажно-твердых отходов энергетических реакторов. В глубоких деминерализаторах на атомных электростанциях широко используются смоляные пласты. Порошкообразные смолы редко применяются на реакторах типа PWR, но используются в деминерализаторах с фильтрующим слоем на подкладке в реакторах типа BWR. Во многих BWR крупным источником отходов с порошкообразными смолами являются „конденсатные полировальные материалы“, используемые для дополнительной очистки конденсационной воды после выпаривания жидких отходов.

Используемые на АЭС для обработки жидких отходов фильтры на подкладке создают еще один вид влажнотвердых отходов – шламы фильтровых отходов. Вспомогательные фильтровальные средства (обычно диатомовая земля или целлюлозные волокна) и грубые вещества, удаляемые из жидких отходов, вместе составляют фильтровые шламы. Некоторые фильтровальные системы не требуют фильтровальных вспомогательных материалов. Поэтому шламы, образующиеся на таких установках, не содержат других материалов.



Обработка и кондиционирование жидких твердых отходов

Жидкие отходы АЭС содержат растворимые и нерастворимые радиоактивные компоненты (продукты деления и коррозии) и нерадиоактивные вещества. Общей целью методов обработки отходов является очистка жидких отходов до такой степени, чтобы их очищенную часть можно было сбросить в окружающую среду или снова использовать. Концентрат отходов является объектом дальнейшего кондиционирования, хранения и захоронения. Поскольку на АЭС образуются почти все виды жидких отходов, на них применяются почти все процессы обработки радиоактивных эфлюентов. Для очистки потоков жидких отходов применяются стандартные способы. Каждый процесс оказывает конкретное воздействие на их радиоактивное содержание. Комбинационное применение этих процессов зависит от уровня и источника загрязнения. Существуют четыре основных технических процесса для обработки жидких отходов: выпаривание, химическое осаждение/флокуляция, отделение твердой фазы и ионообменная сорбция.

Эти методы обработки хорошо отработаны и широко используются. Во многих странах, однако, прилагаются усилия по повышению безопасности и экономичности обработки на основе новых технологий.

Наибольший эффект в отношении сокращения объема жидких отходов (по сравнению с другими методами) достигается выпариванием. В зависимости от состава жидких эфлюентов и от типа выпарных аппаратов достигаются коэффициенты очистки от 10^4 до 10^6 .

Выпаривание – испытанный метод обработки жидких радиоактивных отходов, обеспечивающий надлежащую очистку и сокращение объема. При переходе воды в паровую фазу остаются нелетучие компоненты, такие как соли, которые содержат большую часть радионуклидов. Выпаривание – вероятно, наилучший метод для отходов, имеющих относительно высокое содержание солей с широким гетерогенным химическим составом (см. рисунок).

Выпаривание считается довольно простой операцией, много лет успешно применяемой в химической промышленности, но его использование в обработке радиоактивных отходов ставит такие проблемы, как коррозия, образование накипи и пенообразование. Остроту этих проблем можно уменьшить путем принятия соответствующих мер. Например, регулируя pH, можно замедлить коррозию. Уменьшение пенообразования достигается путем удаления органических веществ или добавления противопенных средств. Систему выпаривателей можно очищать азотной кислотой, удаляющей накипь и обеспечивающей надлежащую пассивацию конструктивных материалов.

До сих пор сокращение объема малоактивных эфлюентов с помощью выпаривания оказывалось столь эффективным, что очищенный конденсат сбрасывался в окружающую среду без дальнейшей обработки.

Методы химического осаждения, основывающиеся на принципе разделения коагуляция-флокуляция, применяются на АЭС в основном для обработки жидких эфлюентов низкой активности и с высоким содержанием солей и шламов. Их эффективность

зависит главным образом от химического и радиохимического состава жидких отходов. Большинство радионуклидов могут быть осаждены, соосаждены и абсорбированы нерастворимыми соединениями (например, гидроокиси, карбонаты, фосфаты и ферроцианиды) и таким образом удалены из раствора. Осаждающие вещества физически увлекают за собой взвешенные в растворе частицы. Однако по некоторым причинам разделение никогда не бывает полным, и потому достигаемые коэффициенты очистки относительно малы. В связи с этим химическая обработка проводится обычно в сочетании с более эффективными методами.

Отделение твердой фазы осуществляется с целью удаления из жидких отходов взвешенных и осаждаемых твердых веществ. Существует несколько видов разделительного оборудования, созданного на основе тех установок, которые применяются в промышленности для обработки обычных эфлюентов и воды. Наиболее известными являются фильтры, центрифуги и гидроциклоны. Разделение частиц – хорошо отработанная технология. Почти на всех ядерных установках используются механические устройства по отделению взвешенных твердых веществ в потоках жидких отходов.

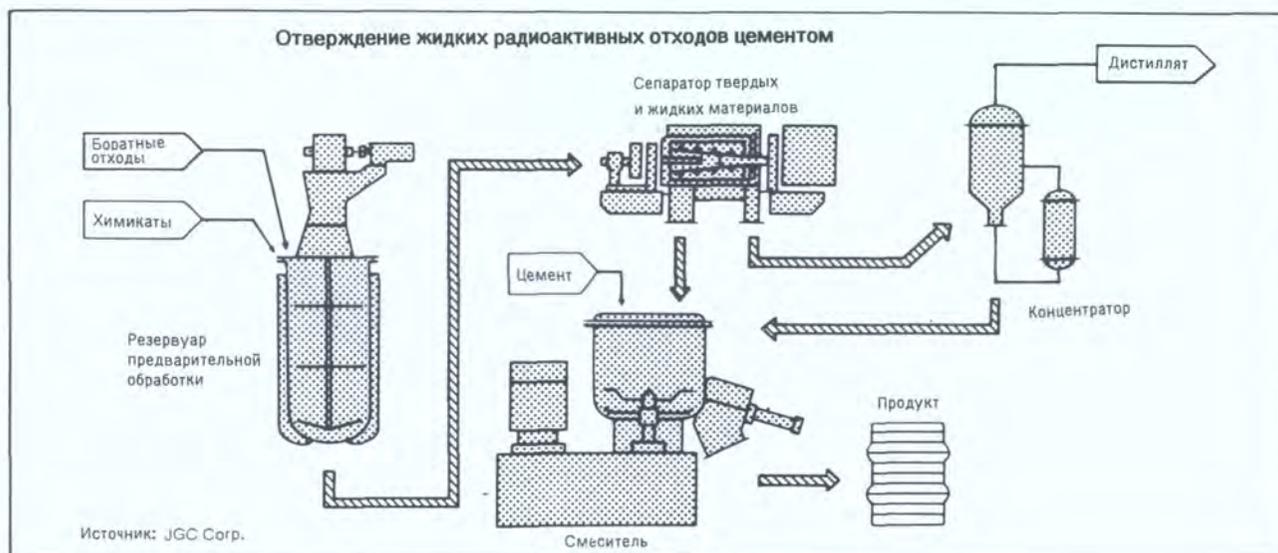
Разделительное оборудование требуется обычно для удаления частиц, способных интерферировать с процессами обработки жидких отходов (например, ионообменная сорбция) или с повторным использованием воды.

Типовые фильтры могут удалять частицы субмикронных размеров, особенно при применении фильтрующего слоя на подкладке. Отработавший фильтр либо помещается в „обратный поток” для сбора шлама, содержащего примерно 20–40 % твердых веществ, либо заменяется, если он – патронного типа.

Ионообменные методы широко применяются на АЭС для обработки жидких эфлюентов, например, при очистке охладителя первого и второго контуров в водных реакторах, при обработке воды бассейна для хранения топлива, при полировании конденсатов после выпаривания.

Жидкие радиоактивные отходы подвергаются ионообменной обработке при их соответствии следующим критериям: низкая концентрация в отходах взвешенных твердых веществ; небольшое содержание солей в отходах (менее 1 грамма на литр); радионуклиды должны находиться в соответствующей ионной форме. (Для удаления коллоидов можно использовать фильтры с порошкообразной смолой.)

В большинстве технических систем ионообменные процессы осуществляются с использованием фиксированного слоя ионообменного вещества, помещаемого в колонку, через которую пропускают загрязненный эфлюент либо сверху вниз, либо наоборот. После насыщения активными группами (пропускная способность) ионообменное вещество может быть регенерировано. Некоторые виды ионообменников также удаляются, если концентрат отходов подлежит отверждению. Поэтому ионообменный процесс является полупостоянным и требует значительных усилий по выполнению таких операций, как промывка, регенерация, прополаскивание и пополнение.



Получаемые при обработке жидких отходов влажные твердые вещества должны для окончательного захоронения трансформироваться в твердые продукты. Процессы иммобилизации включают в себя конверсию отходов в химически и физически стабильные формы, что уменьшает возможность миграции или дисперсии радионуклидов в результате процессов, потенциально возможных при их хранении, транспортировке и захоронении. По возможности кондиционирование отходов также должно завершаться сокращением их объема.

Для кондиционирования влажных твердых веществ чаще всего применяются такие методы, как цементование, битумизация, включение в полимеры. Многие годы во многих странах широко практиковалась иммобилизация радиоактивных отходов с помощью цемента (см. рисунок). Цемент имеет ряд преимуществ, и прежде всего, низкую стоимость и возможность применять установку с относительно простой технологией обработки. Относительно высокая плотность цемента позволяет придать отходам формы, обеспечивающие значительный уровень самозащиты, что уменьшает требования к дополнительному упаковочному экранированию. В некоторых случаях для получения продукта приемлемого качества могут приниматься меры по предварительной химической или физической обработке. Иногда применяются такие дополнительные альтернативные материалы, как размельченная топливная зола и шлак доменной печи. Они также позволяют улучшить защитные свойства простого цемента.

В течение ряда лет в различных странах для отверждения влажных твердых тел использовалась битумизация. Это – горячий процесс, позволяющий влажному потоку высыхать до иммобильности и упаковки. При этом достигается существенное уменьшение объема подлежащих захоронению кондиционированных отходов с определенной экономией в затратах. Однако битум – потенциально воспламеняем и требует особых предосторожностей для предотвращения случайного возгорания. Тем не менее, битумизация находит растущее признание в странах, производящих отходы, и применяется для

кондиционирования радиоактивных отходов на атомных электростанциях США, Японии, Швеции, СССР, Швейцарии и других стран.

Включение влажных твердых тел в пластики или полимеры представляет собой новый процесс иммобилизации по сравнению с применением цемента или битума. Использование таких полимеров, как сложный полиэфир, винилэфир, эпоксидная смола, ограничивается теми случаями, когда применение цемента или битума технически не пригодно. Эти полимеры гораздо дороже цемента и битума и требуют сложной установки для соответствующей обработки отходов. Преимуществами полимеров являются большее сопротивление утечке радионуклидов и химическая инертность.

В последнее время увеличивается интерес к использованию мобильных установок по кондиционированию радиоактивных отходов АЭС. Это связано с тем, что такие установки позволяют экономить средства там, где на площадках образуются небольшие количества отходов. Мобильные установки по иммобилизации и кондиционированию радиоактивных отходов АЭС применяются, например, в США, Федеративной Республике Германии и Франции. Большая часть из них пользуется процессом цементации, но имеются также и проекты применения полимеров.

Газообразные отходы и радиоактивные аэрозоли

При нормальной работе атомных электростанций в воздухе образуются газообразные радиоактивные отходы в виде частиц или аэрозолей. Радиоактивные аэрозоли включают в себя частицы различных размеров в жидкой и твердой форме и, возможно, в сочетании с нерадиоактивными аэрозолями. Тремя основными источниками аэрозолей являются: эмиссия активированных продуктов коррозии и продуктов деления, радиоактивный распад газов на нелетучие элементы и абсорбция летучих радионуклидов, образуемых в процессе деления на имеющемся взвешенном веществе.

К числу наиболее значительных летучих радионуклидов, образующих газообразные радиоактивные отходы нормально работающих АЭС, относятся галогены, благородные газы, тритий и углерод-14. Состав и степень радиоактивности различных потоков отходов в воздухе зависят в основном от типа реактора и пути выброса.

Все газообразные эффуенты до их выброса в атмосферу обрабатываются на АЭС с целью удаления большей части радиоактивных компонентов.

Обработка газообразных эффуентов

Общепринятой практикой на АЭС в отношении загрязненных газов и воздуха зданий является пропускание их через фильтры с целью удаления активных частиц до выброса в атмосферу по вытяжным трубам. Для вентиляции и системы очистки воздуха обычно используются фильтры грубой очистки, за которыми следуют высокоэффективные воздухоочистители (HEPA). Их эффективность в отношении удаления частиц размером 0,3 мкм составляет 99,9 % и выше.

Образующийся на АЭС радиоактивный йод удаляется обычно с помощью пропитанных древесным углем фильтров в сочетании с фильтрами для частиц. Пропитка требуется для улавливания в газовых эффуентах органических соединений йода.

Учитывая, что выделяемые в небольшом количестве топливными элементами благородные радиоактивные газы являются в основном короткоживущими, целесообразно задержка их выхода, что позволяет благодаря процессам радиоактивного распада значительно уменьшить количества газов, окончательно сбрасываемых в окружающую среду. Для этой цели применяются два метода задержки: хранение газов в специальных резервуарах и пропускание их через задерживающие пластины древесного угля.

При хранении для распада благородные газы и газ-носитель закачиваются в резервуары, которые после этого герметизируются. По истечении срока хранения в 30–60 дней содержимое резервуаров выпускается в атмосферу с помощью вентиляцион-

ной системы. Если сброс в атмосферу оказывается преждевременным, срок хранения продлевается.

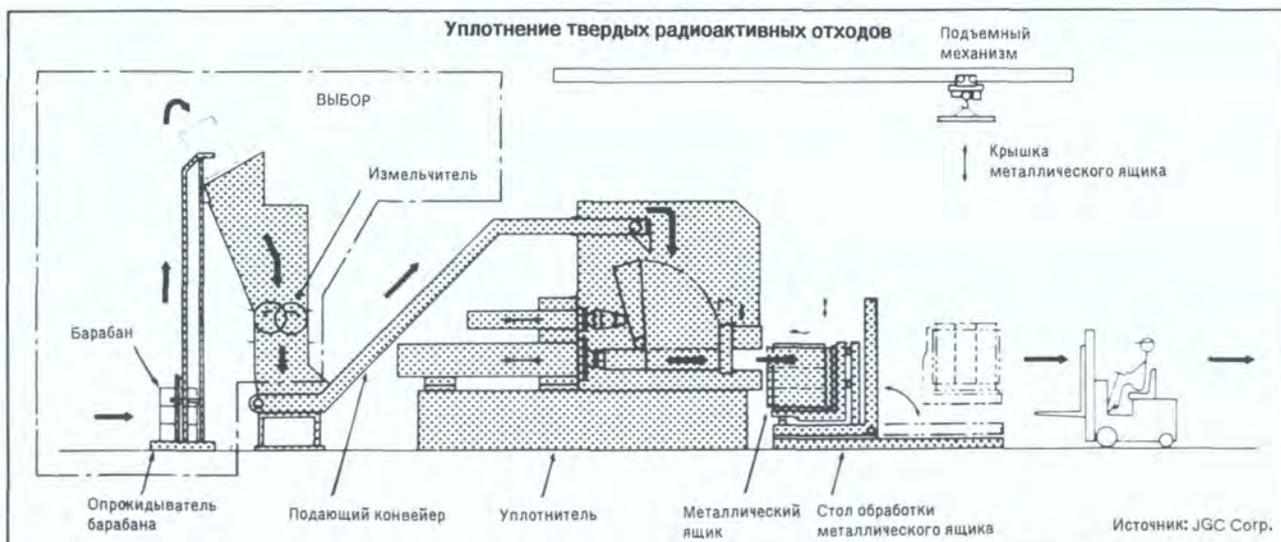
Пласты задержки газов – это ряд сосудов, наполненных древесным углем. Они задерживают прохождение благородных газов от отношению к газу-носителю, обеспечивая завершение процесса радиоактивного распада.

Обработка и кондиционирование твердых отходов

При работе атомной электростанции образуются и различные виды сухих твердых отходов, содержащих радиоактивные вещества. Они различны на различных установках и включают в себя ненужные предметы реакторной установки, фильтры вентиляционной системы, покрытия полов, загрязненные инструменты и т.д. Другой источник твердых отходов – предметы (различные бумаги, пластики, резина, ветошь, одежда, небольшие металлические или стеклянные предметы), используемые при обеспечении работы и ремонта атомной электростанции. В зависимости от физической природы и применяемых методов обработки сухие твердые отходы классифицируются и сортируются на четыре основные категории: сгораемые, несгораемые, компактные и некомпактные отходы. Но обычно каждая установка имеет собственную классификацию отходов в зависимости от преобладающих условий.

Одна из основных целей обработки твердых отходов заключается в максимально возможном уменьшении объема отходов, подлежащих хранению и захоронению, а также в предельной концентрации и иммобилизации радиоактивности в отходах.

Поскольку твердые радиоактивные отходы атомных электростанций включают в себя широкий ряд материалов и форм, не существует единого способа соответствующей их обработки. Основной и наиболее распространенный метод обработки объемных партий твердых отходов основывается на уплотнении. Этот метод позволяет уменьшить до разумной величины объем, требуемый для хране-





ния и захоронения отходов. Но с его помощью мало что достигается в отношении их свойств с точки зрения долгосрочного обращения.

Опыт показывает, что от 50 % до 80 % твердых радиоактивных отходов АЭС могут сжигаться. Сжигание является уже существенным прогрессом по отношению к простому уплотнению. Достигается очень большое сокращение объема и массы отходов. Конечный продукт – гомогенный пепел – может быть упакован в контейнеры для хранения и захоронения без дальнейшего кондиционирования. Хотя сжигание годится только для горючих отходов, оно имеет то преимущество, что способно разрушать органические жидкости (масла, смазки, растворители), которые трудно обрабатывать другим способом (см. рисунок).

Сжигание небольших количеств твердых отходов обычно производится на сравнительно небольших установках. Такие установки имеются на АЭС США, Японии, Канады и других стран. Более совершенными установками, способными сжигать отходы с довольно высокой удельной активностью, располагают центры по обработке отходов, принимающие их от многих АЭС страны и из-за границы. Такие центры функционируют в Швеции, Бельгии, Франции и других странах.

Для уменьшения физических размеров отдельных видов отходов используются в качестве мер предварительной обработки уплотнение или сжигание, резка, измельчение и дробление. Бумага, пластики, ткань, картон, дерево и металлы можно разрезать на лентообразные куски, а ломкие материалы (стекло, бетонные блоки) – раздробить на мелкие куски. Эти способы можно применять в качестве основных процессов уменьшения объема твердых отходов.

Новые разработки

Большинство процессов обработки и кондиционирования ОНСА достигли передового промышленного уровня. Хотя эти процессы и технологии обеспечивают эффективное обращение с радиоактивными отходами АЭС, возможно и желательно дальнейшее их совершенствование. Увеличивающаяся стоимость захоронения радиоактивных отходов побуждает к разработке процедур и методов, уменьшающих количества отходов и их объемы на стадии обработки и кондиционирования. В данной статье невозможно показать все новые разработки и усовершенствования в этой области в государствах-членах.

Примерами таких разработок являются использование специальных неорганических растворителей для улучшения обработки жидких отходов; применение мембранных методов обработки жидких отходов; обезвоживание и высушивание шламов смолистых пластов и фильтров; сжигание отработавших ионообменных смол; сухая очистка защитной ткани для уменьшения количества стоков от стирки; применение герметичных контейнеров для упаковки высушенных фильтровых шламов; остекловывание некоторых отходов среднего уровня активности для уменьшения объемов отходов, подлежащих захоронению; сверхуплотнение несгораемых отходов.

Возможно не все из указанных разработок найдут широкое применение в технологии обращения с отходами, особенно на атомных электростанциях. Но ведущиеся исследования и разработки отражают тот факт, что ядерная промышленность и установки уделяют большое внимание безопасному и экономичному обращению с радиоактивными отходами на атомных электростанциях и что ожидаются усовершенствования в существующей технологии.

