



УДК 621.039.736

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ КОНДИЦИОНИРОВАНИЯ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОЦЕССОВ В «КИПЯЩЕМ СЛОЕ»

Масанов О.Л., к.х.н. (masanov@secnrs.ru)
(ФБУ «НТЦ ЯРБ»)

Статья адресована специалистам по развитию технологий обращения с радиоактивными отходами на предприятиях ядерного топливного цикла и АЭС и содержит анализ применения процессов в «кипящем слое» для переработки ЖРО. Рассмотрен международный опыт использования данной технологии, сформированы предложения по ее внедрению в российской атомной отрасли.

► **Ключевые слова:** радиоактивные отходы, переработка, пиролиз, риформинг, «кипящий слой», передвижные комплексы.

IMPROVEMENT OF TECHNOLOGIES OF RADIOACTIVE WASTE CONDITIONING WITH THE USE OF PROCESSES IN THE «FLUIDIZED BED»

Masanov O., Ph. D.
(SEC NRS)

Paper is addressed to specialists in the development of radioactive waste management technologies at nuclear fuel cycle facilities and nuclear power plants and contains an analysis of the application of processes in the «fluidized bed» for LRW processing. Paper provides the observation of international experience of using this technology, and also proposals for its implementation in the Russian nuclear industry.

► **Key words:** radioactive waste, waste management, pyrolysis, reforming, «fluidized bed», mobile installations.

Решение проблемы безопасного захоронения радиоактивных отходов (РАО) осуществляется за счет создания многобарьерной системы их изоляции от сферы жизнедеятельности человека и охраны окружающей среды. Суть ее состоит в кондиционировании отходов, размещении их в упаковочном комплекте и хранении или захоронении последних на поверхности земли, либо в геологических формациях. Проведенные многочисленные исследования показали, что включение РАО в твердый матричный материал с получением минералоподобной структуры, а также размещение его в упаковочном комплекте повышает безопасность захоронения. Свойства компаундов отходов зависят от используемой технологии их получения, состава матричного материала, химической составляющей радиоактивной среды и многих других компонентов. Основное требование надежности многобарьерной системы изоляции при захоронении отходов определяется скоростью миграции радионуклидов из хранилища. При этом эффективная доза облучения населения, обусловленная РАО, после их захоронения не должна превышать 10 мкЗв/год.

Представленный обзор посвящен рассмотрению обращения с РАО на АЭС и объектах топливного цикла и, в частности, методов переработки высокосолевых кубовых остатков радиохимических производств [1], солевых пластов, кубовых остатков и органических отходов АЭС, а также битумных компаундов, хранящихся наливом в каньонах на Ленинградской и Калининской АЭС.

В настоящее время в мировой практике в качестве часто применяемых способов перевода РАО в кондиционированное состояние используются процессы их переработки в ходе остекловывания, битумирования и цементирования. Однако в конце прошлого столетия помимо указанных методов перевода жидких радиоактивных отходов (ЖРО) в кондиционированное состояние нашел также свое применение процесс термохимического парового преобразования (риформинга) отходов при псевдооживлении в аппаратах с «кипящим слоем». Технология термохимического преобразования жидких и твердых РАО в аппаратах с псевдооживленной насадкой рассматривается в настоящее время в качестве одной из конечных фаз процесса их кондиционирования [2, 3, 4].

Псевдооживление или процесс в «кипящем слое» возник во время Второй мировой войны вместе с каталитическим крекингом газаolina и с тех пор используется во многих областях техники. В ходе термохимического преобразования

слой гранул в аппарате риформинга переводится в псевдооживленное состояние при пропускании через них перегретого пара и/или газа, а также осуществляется взаимодействие пара и углеводородов (при их наличии) с получением водорода и окиси углерода и происходит восстановление нитрат-иона до атмосферного азота. Сегодня в мировой практике эксплуатируют десятки тысяч промышленных установок «кипящего слоя»: крекинга газаolina, газификации угля, производства минералов и переработки отходов, использующих схожее оборудование, такое как аппараты сушки/испарения, нагрева/охлаждения, роста и измельчения частиц слоя и проведения химических реакций. Так, только в Китае [5] действует свыше 10 000 установок переработки бумажных пульп в «кипящем слое».

История использования технологии псевдооживления в переработке РАО связана с шестидесятыми годами прошлого столетия. Именно в это время псевдооживление было применено в ходе восстановления и гидрофторирования урановых концентратов [2], процесса кальцинации жидких высокоактивных отходов [3], вводимых в «кипящий слой» с нагретыми сферическими частицами, испарения воды и азотной кислоты из растворов с получением твердой фазы (рис. 1). Так, в Айдахо Фоллс на двух установках кальцинации [4] было переработано несколько тысяч кубических метров азотнокислых растворов алюминия при переводе их в алюминиевый кальцинат (Al_2O_3 , который насыпью хранится в емкостях до настоящего времени).

Необходимо отметить, что в СССР [6] с использованием растворов-имитаторов ЖРО (нитратов натрия и алюминия) и флюсующих добавок – фосфорной кислоты и патоки на установке КС-КТ-100 («кипящий слой» – керамический тигель) также отработывался процесс термического преобразования солей в кальцинат с целью последующего их кондиционирования в керамическом тигле. Однако наличие в отходах значительного количества легкоплавкого нитрата натрия затрудняло проведение процесса кальцинации вследствие агломерации частиц «кипящего слоя» при температурах > 300 °С.

На рубеже столетий на ФГУП «ПО «Маяк» была также сконструирована и изготовлена экспериментальная установка кальцинации органических отходов (трибутилфосфат (ТБФ) с керосином) в «кипящем слое» с переводом их в фосфат кальция с производительностью 20 dm^3 /час при введении в процесс нитрата кальция, что подавляло образование аэрозольной дисперсии P_2O_5 в газовой фазе. В то же время в АО «ВНИИИМ» были осуществлены

лабораторные исследования обработки процессов термопреобразования гексахлорбутадиена (ГХБД) и органического теплоносителя (смеси фенила и дифенилбензола) на установках с «кипящим слоем» при производительности до 5 дм³/час [7].

Уже в начале нынешнего века в АО «ВНИИНМ» также была изготовлена лабораторная установка и проведены ее испытания в ходе обработки технологии термического разрушения ионообменных смол (ИОС) в «кипящем слое» и перевода перлита в измельченное состояние, что послужило основанием для получения патента [8] и разработки конструкторской документации на изготовление опытного образца установки термохимического преобразования ИОС.

Ранее было установлено, что в целом ряде технологических процессов при температурах порядка 1 000 – 1 500 °С в ходе кальцинации, холодного и/или горячего прессования и спекания РАО и глин могут образовываться минеральные фазы. Было показано также, что кристаллические формы отходов, образованные с введением в процесс глинистых минералов, могут быть с успехом применены и в интервале температур 600 – 750 °С при наличии гидротермальной реактивности [9].

Так, в 1981 г. в исследовании Роя [10] было предложено использовать низкотемпературную гидротермальную переработку отходов с полу-

чением малорастворимых фаз слюд, апатитов, поллицитов, содалитов-конкринитов и нефелинов, которые могли быть получены из взаимодействия различных видов глин (каолинов, бентонитов, иллитов) и растворов отходов. Однако промышленная установка непрерывного процесса переработки РАО при умеренных температурах в гидротермальных паровых условиях была представлена в г. Erwin (штат Tennessee) шведской фирмой «Studsvik» лишь в 1999 г. [11]. На установке THOR («термическое разрушение органики») была использована первоначально паровая преобразующая технология пиролиза загрязненных ¹³⁷Cs и ⁶⁰Co ИОС АЭС. Однако в дальнейшем процесс был применен для переработки различных твердых и жидких РАО, включая активированные угли, шламы загрязненных масел, растворителей, кубовых остатков трапных вод и растворов дезактивации при уровне мощности экспозиционной дозы вплоть до 400 Р/час. Если каолиновая глина добавлялась к щелочно-обогащенным отходам при переработке, то в ходе процесса возникали составы различных фельдшпатоидных минералов, то есть содалитов с захватом галогенов и Tc-99, нозеан-минералов для поглощения сульфатов или сульфидов и нефелина, депонирующего остающуюся щелочь путем взаимодействия на наноуровне глины и отходов.

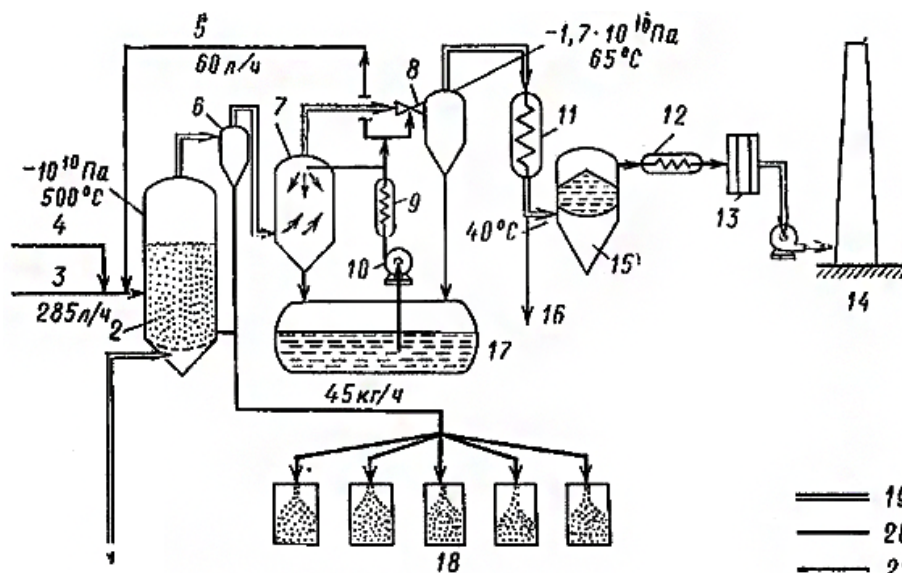


Рис. 1. Схема установки кальцинации РАО:

1 – флюидизирующий воздух; 2 – кальцинатор; 3 – раствор отходов; 4 – добавки; 5 – рециркуляция скрубберного раствора; 6 – циклон; 7 – охлаждающий бак; 8 – скруббер Вентури; 9 – холодильник; 10 – насос; 11 – конденсатор; 12 – нагреватель; 13 – фильтры; 14 – труба; 15 – слой силикагеля; 16 – на упарку отходов, 100 л/ч; 17 – охлаждающий бак; 18 – бункера для хранения кальцинатов; 19 – газы; 20 – жидкости; 21 – твердые

В начале нынешнего тысячелетия между фирмой «Studsвик» и INL DOE, с учетом результата развития процесса THOR, было заключено соглашение по разработке термохимического преобразования РАО среднего уровня активности, образовавшихся при эксплуатации АЭС [12]. В частности, авторами было установлено, что при кондиционировании ЖРО, хранящихся в емкостях, в ходе осуществления процесса FBSR («паровой риформинг в «кипящем слое») возможно сокраще-

ние капитальных затрат и расходов на переработку отходов по сравнению с другими способами: битумирования или цементирования за счет создания передвижных комплексов термохимической переработки РАО и сокращения объемов захораниваемых отходов. На рис. 2 представлено графическое изображение затрат на переработку 1 галлона РАО американских АЭС в зависимости от производительности передвижного комплекса, а на рис. 3 – схема передвижного комплекса переработки РАО АЭС.

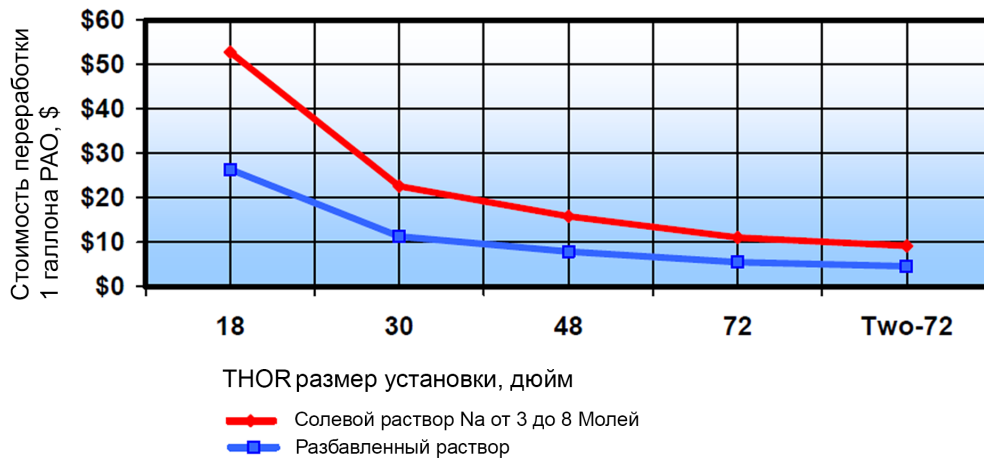


Рис. 2. Стоимость переработки одного галлона РАО АЭС в зависимости от размера аппарата термохимического преобразования

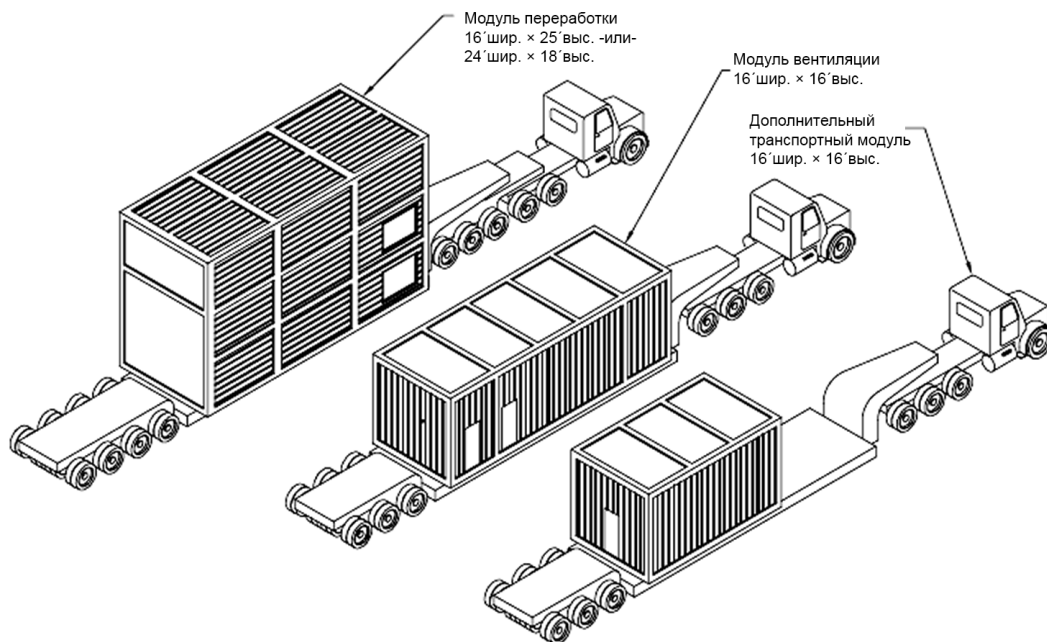


Рис. 3. Передвижной комплекс установки с «кипящим слоем» для переработки РАО АЭС (США)

Переработка ЖРО радиохимических комплексов

Долгие годы ЖРО среднего уровня активности (САО) на комбинате ФГУП «ПО «Маяк» сбрасывались в отдельные водоемы В-9 и В-17, однако, в соответствии с основными стратегическими решениями по модернизации систем обращения, большинство жидких САО в ближайшие годы (20 лет) будут цементировать [13] в комплексе цементирования (КЦ) путем их смешения, упаривания и омоноличивания с получением цементного компаунда. Однако такой подход вряд ли целесообразен при переработке вод спецканализации химико-металлургического производства завода «20», основанной на процессе соосаждения и кальцинации радионуклидов с оксигидратом железа, поскольку наполнение цементного компаунда по гидрату железа не будет превышать 5 – 10 %. В связи с этим следует отметить, что с целью сокращения объемов захораниваемых отходов в качестве одной из промежуточных стадий обращения с ними может быть использован процесс термохимической обработки САО с последующим геоцементированием.

Проектная производительность создаваемого комплекса цементирования на ФГУП «ПО «Маяк» составляет около 2 000 т цементного компаунда в год. Помимо кислых и щелочных отработанных дезактивирующих растворов и кубовых остатков от упаривания одного из потоков ЖРО, а также декантата аммиачного осаждения урана на комплекс цементирования будут поступать концентрат от переработки низкоактивных ЖРО (НАО), суспензии ИОС радиохимического и реакторного производства и др. [14].

Хранилище КЦ представляет собой сооружение приповерхностного типа и будет использоваться для захоронения РАО. Хранилище рассчитано на создание четырех очередей, каждая из которых заполняется в течение 5 лет.

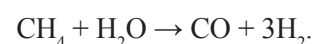
Необходимо отметить, что на ФГУП «ПО «Маяк» придется технологически снизить удельную активность трансурановых элементов (ТУЭ) некоторых растворов, подаваемых на комплекс цементирования, обеспечивая их предварительное максимально возможное удаление (опытная установка отверждения долгоживущих САО вводится в эксплуатацию в рамках ФЦП «Обеспечение ядерной и радиационной безопасности на 2016 – 2020 годы и на период до 2030 года»).

Помимо гомогенных отходов, на ФГУП «ПО «Маяк» существует также группа жидких гетерогенных высокоактивных отходов (ВАО), представляю-

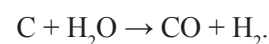
щих гидроксидные, сульфидные и ферроцианидные осадки в концентрированном натрийсодержащем растворе с удельной активностью порядка нескольких Ки/дм³ [13]. Упомянутые ВАО не могут быть остеклованы из-за их высокой коррозионной активности, но они могут быть кондиционированы в процессе термохимического преобразования с получением минералоподобного материала и последующей геополимеризацией отходов и их захоронением в Нижнеканском пункте глубинного захоронения радиоактивных отходов (ПГЗРО) вследствие значительного содержания α -излучателей в конечных формах.

Несколько иной подход с целью обращения с ЖРО химико-металлургического производства на ФГУП «ПО «Маяк» в настоящее время реализуется путем разработки проекта комплекса очистки жидких САО и НАО, который заключается в нейтрализации растворов, выделении осадков на стадии микрофльтрации и их сушке в ходе проведения процесса в аппарате кальцинации и последующего цементирования. Однако такой подход не эффективен из-за малого наполнения цементного компаунда кальцинатом и необходимости захоронения его в Нижнеканском ПГЗРО. Процесс риформинга с получением минеральных соединений, содержащих гранецентрированные кубические решетки со стандартной структурой AE_2X_3 при температурах 650 – 750 °С, приводит к образованию шпинелей, обладающих более низкой скоростью выщелачивания, и сокращению объемов захораниваемых отходов по сравнению с цементными компаундами.

В состав технологий комплексов термохимических преобразований процессов THOR и FBSR входят несколько часто используемых способов переработки РАО: упаривание, сорбция, паровой пиролиз, химическое взаимодействие и др. При этом паровое преобразование углеводородов связано с процессом генерирования водорода при взаимодействии их с водяным паром:



Однако если используется углеродный источник, то он первоначально подвергается пиролизу или испарению и затем реагирует с перегретым паром согласно следующей реакции:



Следует отметить, что образовавшийся в ходе реакций водород взаимодействует с кислородом и, таким образом, избытка водорода в газовой системе не возникает.

Как правило, установка риформинга состоит из двух аппаратов с «кипящими слоями». Первый аппарат эксплуатируется в восстановительной среде и его функцией является испарение жидких потоков отходов, разрушение органических соединений, восстановление нитратов, нитритов и азотной кислоты до элементарного азота и образование твердых минеральных продуктов. Аппарат первой стадии риформинга получил название минерализатора. В качестве оживающей среды в этом аппарате используется перегретый пар с температурой 550 – 600 °С при вакуумном давлении. Материал слоя состоит из гранул твердых добавок и сорреагентов, таких как углерод, глина, кремний и/или катализатор с размерами частиц 200 – 250 мкм.

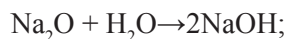
Жидкие отходы поступают в «кипящий слой» после небольшой предобработки (то есть концентрирования или разбавления отходов, введения суспензии глины и т. д.). По аналогии с вышепредставленными паровым и химическим преобразованиями углерод подается в «кипящий слой» для получения H_2 и CO . Для органических соединений отходов, которые подвержены пиролизу, образование различных углеводородов с получением восстановительной среды происходит по следующим реакциям:



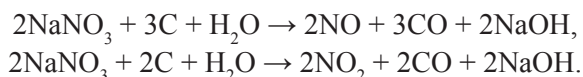
для нитратов в жидких отходах:



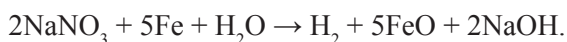
в паровой окружающей среде окислы натрия переходят в щелочь:



суммарные реакции могут быть представлены следующими уравнениями:



Затем окислы азота (NO и NO_2) восстанавливаются до азота при взаимодействии с C , CO или H_2 , которые образовывались в ходе взаимодействия пара и органических материалов. Нитраты могут также восстанавливаться при вводе катализатора или металла, например:



Во втором аппарате псевдоожижения в ходе операционного процесса поддерживается окислительная среда и он используется для дожигания отходящих газов. Псевдоожижающей средой второго аппарата процесса риформинга являются отходящие газы аппарата первой стадии с добавлением нагретого воздуха. Особенность процесса в этом случае связана с газификацией тончайших углеродных частиц, выносимых из первого аппарата и прошедших систему высокоэффективной газоочистки окислением CO и H_2 до CO_2 и H_2O , и превращением следов кислых газов в стабильные щелочные соединения путем взаимодействия этих кислот со средой слоя, состоящей из карбоната или силиката кальция.

Некоторые дополнительные особенности этих преобразований для переработки солевых САО радиохимических производств перечислены ниже:

- в первый аппарат «кипящего слоя» изначально вводится насадка псевдоожижения и температура в нем устанавливается с помощью нагретого воздуха и последующим его замещением на перегретый пар с температурой 550 – 600 °С;
- для более полного окисления газообразных составляющих в верхнюю часть «кипящего слоя» первого аппарата в ходе процесса вводят кислород (воздух);
- все компоненты термохимического преобразования вводятся в «кипящий слой» с помощью распылительных форсунок с использованием газообразного азота и переводятся в паровое состояние;
- натрий и калий из отходов с помощью каолиновой глины превращаются в малорастворимый минеральный продукт, главным образом натриевый алюмосиликат, содержание Na_2O в котором может достигать более 19 % по весу;
- сульфаты, хлориды, фосфаты, фториды и бораты из отходов входят в состав минеральной структуры (Na-Al-Si) и лишь незначительное их количество попадает в отходящие газы;
- радионуклиды из отходов закрепляются в твердом минеральном продукте (99,99 %), за исключением трития, углерода ^{14}C и I, которые возгоняются при температуре процесса (650 – 750 °С).

Следует отметить, что в соответствии с отчетом международной группы экспертов МАГАТЭ о практике глубоинной закачки ЖРО с целью повышения долговременной безопасности их захоронения, Российской Федерации предлагается также проводить иммобилизацию САО и НАО вблизи места захоронения, что может быть осуществлено путем их ввода в глинистую суспензию с получением

минеральной формы отходов и последующей геополимеризацией [12].

Переработка ЖРО АЭС в процессе с «кипящим слоем»

Основной целью первоначально принятых положений обращения с ЖРО на АЭС было исключение неконтролируемого распространения радионуклидов за пределами объектов, а безопасность и надежность обеспечивались проектными решениями. Однако с ростом сроков эксплуатации АЭС возникла необходимость расширения хранилищ ЖРО, в связи с чем было принято решение о начале разработок технологий и оборудования для кондиционирования этих отходов. На практике это вылилось в разработку процессов битумирования, цементирования и глубокого упаривания ЖРО с получением солевого плава.

Использование глубокого упаривания на АЭС с реакторами типа ВВЭР было направлено на реализацию процесса обезвоживания концентратов солей натрия-боратов в диапазоне 120 – 130 °С, что приводило к сокращению объемов отходов при остывании плава с получением псевдотвердого материала. Так, в настоящее время на Балаковской и Нововоронежской АЭС число контейнеров с хранящимся плавом достигает нескольких десятков тысяч единиц, хотя плавы не являются твердым РАО и требуют последующего кондиционирования перед захоронением.

Однако кубовые остатки АЭС, в том числе и солевые плавы, могут быть переведены в твердое минеральное состояние в ходе проведения процесса термохимического преобразования при температурах 650 – 750 °С [12, 15].

Так, в ходе введения в процесс алюмосиликатного минерала в «кипящем слое» возникают различные минеральные фазы, включая ангидриды и содалиты. Семейство содалитовых минералов является уникальным, поскольку они имеют клеточную структуру, образованную алюмосиликатными тетраэдрами. Введение в «кипящий слой» объемного алюмосиликата создает условия возникновения в нем многочисленных фаз, таких как нефелин, содержащий в своем составе SiO_2 . В щелочных алюмосиликатных минеральных структурах радиоактивные нуклиды размещаются в структурах кубической формы и эти внутренние кубически-подобные структуры все связаны с атомами кислорода. Таким образом, минералы, образованные из натриевых растворов

отходов и вводимых добавок (каолиновой глины), содержат SiO_2 и Al_2O_3 [16].

Необходимо отметить, что получаемые минеральные компоненты процесса обладают повышенной водоустойчивостью к выщелачиванию и даже могут быть захоронены без размещения в контейнере (рис. 4) [17]. В случае же последующего омоноличивания полученных отходов с использованием процесса геополимеризации наполнение компаунда может достигать величины порядка 60 – 80 %, в то время как наполнение цементного компаунда при обращении с солевыми растворами (комплекс цементирования ФГУП «ПО «Маяк») составляет около 20 %. Таким образом, в случае переработки САО АЭС с ВВЭР общая величина сокращения объемов захораниваемых отходов процесса термохимического преобразования кубовых остатков возрастет в 5 – 6 раз.

Последовательность необходимых преобразований, предлагаемая для битумного компаунда, хранящегося наливом на Ленинградской и Калининской АЭС, и преимущества, приобретаемые им в результате этих преобразований (на примере битумных эмульсий), перечислены ниже:

- битумные компаунды извлекаются из каньонов АЭС при нагреве и переводятся в состояние водной эмульсии;
- первый аппарат риформинга разогревается с помощью воздуха с температурой 500 – 600 °С и перегретого пара при вакуумметрическом давлении;
- гранулы «кипящего слоя» размером около 200 – 250 мкм приводятся в псевдооживленное состояние;
- все водные компоненты отходов (каолиновая суспензия и битумная эмульсия) переходят в паровое состояние;
- эффективность перевода нитратов и нитритов в атмосферный азот с помощью углерода, СО и H_2 составляет свыше 98 % при температуре 650 – 725 °С;
- натрий и калий из отходов с помощью каолиновой глины превращаются в малорастворимый минеральный продукт, главным образом натриевый алюмосиликат, содержание Na_2O в котором может достигать более 19 % по весу;
- сульфаты, хлориды, фосфаты, фториды и бораты из отходов входят в состав минеральной структуры (Na-Al-Si) и лишь менее 2 % от их общего количества попадает в отходящие газы;
- радионуклиды из отходов закрепляются (99,9 %) в твердом минеральном продукте,

за исключением трития, ^{14}C и I , которые возгоняются при температуре процесса ($650 - 750\text{ }^\circ\text{C}$);

- отходящие газы процесса первого аппарата риформинга проходят высокоэффективную очистку с помощью металлокерамического фильтра;

- вторая ступень преобразования (дожигание) обеспечивает эффективность удаления органики на уровне 99,99 %;

- в ходе проведения процесса термохимического преобразования органическая часть эмульсии превращается, главным образом, в легкие углеводороды, такие как метан, оксид углерода, водород, двуокись углерода и вода в нижней части «кипящего слоя»;

- для более полного окисления газообразных составляющих в верхнюю часть «кипящего слоя» первого аппарата в ходе процесса вводят кислород (воздух).

Заключительной стадией процесса термохимического преобразования битумного компаунда является перевод минеральных форм либо в геополлимерную матрицу, либо их размещение непосредственно в контейнер.

Геополлимеры представляют собой керамически схожие полимеры, возникающие из алюмосиликатов, связанных обычно щелочными металлическими ионами (M_2O) в $4\text{SiO}_2 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{M}_2\text{O}$. Глины (нагретые до возникновения аморфного состояния) или аморфные золы уноса используются в качестве алюмосиликатного стартового материала процесса их кондиционирования. Щелочные или щелочно-

земельные элементы в отходах активируют аморфную алюмосиликатную структуру, превращая ее в сшитые неорганические полимеры [11].

Схожий подход к образующимся и накопленным ЖРО может быть применен для любой АЭС путем замены битума иным восстановителем (активированный уголь, меласса, сахароза, этиленгликоль и др.).

Помимо рассмотренных технологий переработки, упомянутый процесс мог бы быть использован для кондиционирования других видов РАО, включая все жидкие отходы действующих и выводимых из эксплуатации АЭС, в том числе ИОС, кубовые остатки и солевые плавы АЭС с реакторами типа ВВЭР и РБМК, угольные фильтрующие материалы и масла.

Аппаратурно-технологическая схема установки обращения с солевыми САО АЭС представлена на рис. 5.

Стоит отметить, что развитие технологии «кипящего слоя» продолжается и в настоящее время. Так, в 2017 г. между компаниями «Studsвик» и «Beijing DYNATECH Co., Ltd.» (DYNATECH) заключено рамочное соглашение, согласно которому компания DYNATECH получает исключительную лицензию на внедрение процесса FBSR для обращения с РАО на объектах атомной отрасли Китая. По оценкам «Studsвик» для удовлетворения потребностей китайского рынка необходимо создать несколько установок, основанных на технологии FBSR [18].

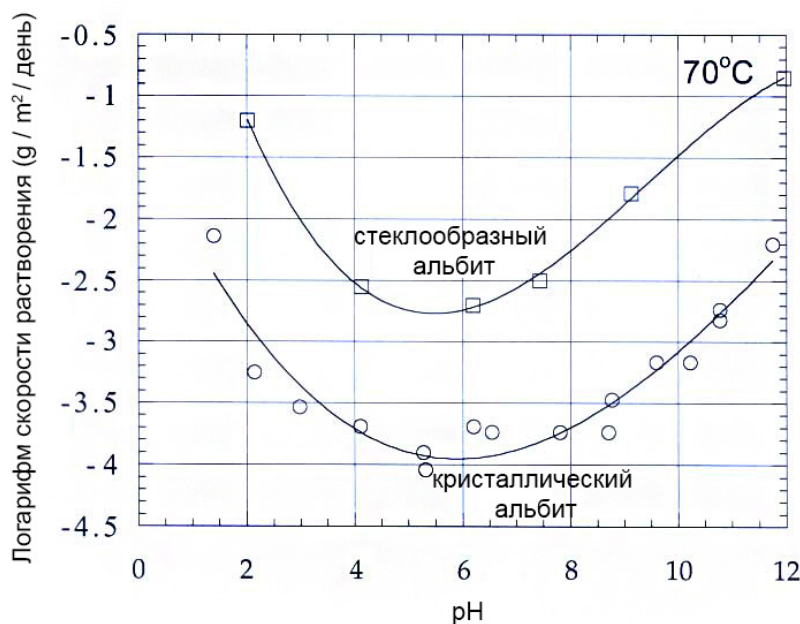


Рис. 4. Сравнение скоростей растворения кристаллического и стеклообразного альбита

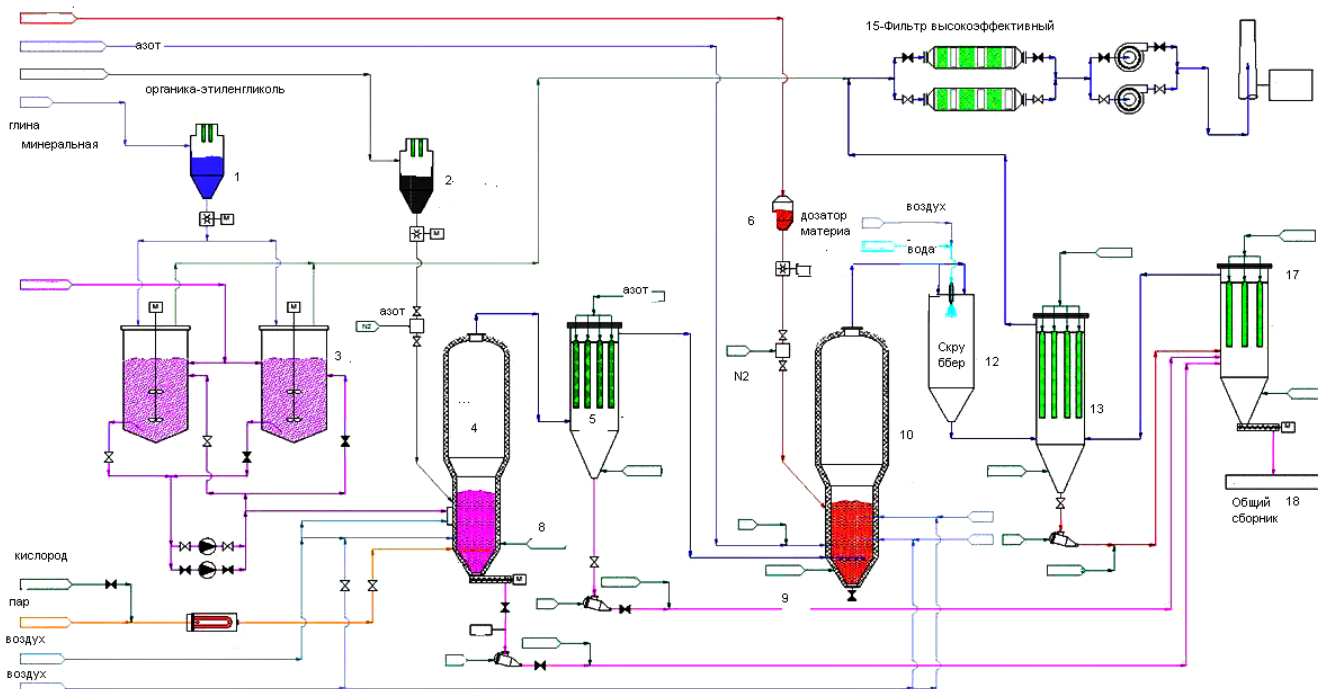


Рис. 5. Аппаратурно-технологическая схема процесса риформинга РАО АЭС

Список литературы

1. Пронь И.А., Колупаев Д.Н., Ремизов М.Б., Козлов П.В., Колтышев В.К., Логунов М.В. Безопасность ядерных технологий и окружающей среды, № 1, 2013.
2. Sutton A.H., Bishop J.C., Cohen M.H., Stahman K.J. Reduction and Hydrofluorination of Uranium Concentrates by Fluid Bed Techniques. CEP, Nuclear Eng. Part XV, volume 62, 1966.
3. Buckham J.A., Ayers A.L., Mc Bride J.A. Fluidized Bed Calcination of High-Level Radioactive Waste in a Plant-Scale Facility. CEP, part XY, vol. 62, 1966.
4. Newby B.J., O'Brien V.H. Summary of Waste Calcination At The Idaho Nuclear Technology and Engineering Center. INEEL/EXT-2000-01206, 2000.
5. Fluidized Bed Reactor (FBR) black liquor treatment Technology, ECI-Sinotrust business Consulting Co, LTD, 2001.
6. Захарова К.П. и др. Физико-химические основы процессов кальцинации и остекловывания радиоактивных отходов / Труды СЭВ. – Колобжег, Польша, 1972.
7. Масанов О.Л. Некоторые особенности сжигания органических радиоактивных отходов в аппаратах с «кипящим слоем». Атомная Энергия, т. 79, в. 2, 1995.
8. Патент RU № 2435240. Способ переработки радиоактивных отходов. Масанов О.Л. и др. – М., 2011.
9. Bradley Mason J., et. al. Studsvik Processing Facility. Proceedings Conference Waste Management. – Tucson, 2000.
10. Roy R. Rational Molecular Engineering of Ceramic Materials. J. Am. Ceram. Soc. 60, 1977.
11. Jantzen C.M. Fluidized Bed Steam Reformer Product Monolith Formation and Characterization. WSRC-STI-2006-00033. – 2006.
12. THOR Steam Reforming Process For Hazardous and Radioactive Wastes Technology, Report, TR-SR02-1, Rev. 1, Richland, WA 99352.
13. Баторшин Г.Ш., Иванов И.А., Козлов П.В., Мокров Ю.Г. Основные стратегические решения по модернизации системы обращения с РАО на ФГУП «ПО «Маяк». Вопросы радиационной безопасности, № 3, 2013.
14. Понькин Е.И., Козлов П.В., Слюничев О.М., Кирьянов К.Е. Результаты численного моделирования разогрева отсека хранилища среднеактивных отходов в ходе заполнения цементным компаундом. Вопросы радиационной безопасности, № 4, 2011.
15. Brent Evans, Arlin Olson, J. Bradley Mason, Kevin Ryan, Carol Jantzen, Charles Crawford. Phoenix Radioactive Benchscale Steam Reformer Demonstration of a Monolithic Steam Reformed Mineralized Waste Form for Hanford Waste Treatment Plant Secondary Waste. – WM, 2012.

16. Khalil M.Y., Merz E. Immobilization of MAW in Alkali-Activated Aluminosilicate Binders (Geopolymers), 2002.
17. Bourcier W.L. Affinity Function for Modeling Glass Dissolution Rates. US DOE Report UCRL-JC-131186, 1998.
18. Studsvik and Beijing DYNATECH Co. Ltd. Signed a Framework Agreement to supply Studsvik's Fluid Bed Steam Reforming Technology to China [Электронный ресурс]. <http://www.studsvik.com/nyhetsarkiv/bed-fluid-steam-reforming-agreement---china/> (Дата обращения: 18.09.2017).

References

1. Pron' I.A., Kolupaev D.N., Remizov M.B., Kozlov P.V., Koltyshev V.K., Logunov M.V. Safety of Nuclear Technologies and Environment, No. 1, 2013.
2. Sutton A.H., Bishop J.C., Cohen M.H., Stahman K.J. Reduction and Hydrofluorination of Uranium Concentrates by Fluid Bed Techniques. CEP, Nuclear Eng. Part XV, volume 62, 1966.
3. Buckham J.A., Ayers A.L., Mc Bride J.A. Fluidized Bed Calcination of High-Level Radioactive Waste in a Plant-Scale Facility. CEP, part XY, vol. 62, 1966.
4. Newby B.J., O'Brien B.H. Summary of Waste Calcination at the Idaho Nuclear Technology and Engineering Center. INEEL/EXT-2000-01206, 2000.
5. Fluidized Bed Reactor (FBR) black liquor treatment Technology, ECI-Sinotrust business Consulting Co, LTD, 2001.
6. Zakharova K.P., et al. Physical and Chemical Fundamentals of Radioactive Waste Calcination and Vitrification Processes / Papers of the Council for Mutual Economic Assistance. – Kolobjeg, Poland, 1972.
7. Masanov O.L. Some Specifics of Organic Radioactive Waste Incineration in Fluidized Bed Apparatus. Atomic Energy, volume 79, issue 2, 1995.
8. Patent RU No. 2435240. Masanov O.L., et al. Radioactive Waste Reprocessing Technique, Moscow, 2011.
9. Bradley Mason J., et al. Studsvik Processing Facility. Proceedings Conference Waste Management. – Tucson, 2000.
10. Roy R. Rational Molecular Engineering of Ceramic Materials. J. Am. Ceram. Soc. 60, 1977.
11. Jantzen C.M. Fluidized Bed Steam Reformer Product Monolith Formation and Characterization. WSRC-STI-2006-00033. – 2006.
12. THOR Steam Reforming Process for Hazardous and Radioactive Wastes Technology, Report, TR-SR02-1, Rev. 1, Richland, WA 99352.
13. Batorshin G.Sh., Ivanov I.A., Kozlov P.V., Mokrov Yu.G. Main Strategic Decisions for Modernization of RAW Management System at FSUE "Mayak" PA. Radiation Safety Challenges, No. 3, 2013.
14. Ponkin E.I., Kozlov P.V., Slyunichev O.M., Kiryanov K.E. Result of Computational Modeling of the Medium Level Waste Storage Section Heatup in the Process of Filling with Cement Compound. Radiation Safety Challenges, No. 4, 2011.
15. Brent Evans, Arlin Olson, J. Bradly Mason, Kevin Ryan, Carol Jantzen, Charles Crawford. Phoenix Radioactive Benchscale Steam Reformer Demonstration of a Monolithic Steam Reformed Mineralized Waste Form for Hanford Waste Treatment Plant Secondary Waste. – WM, 2012.
16. Khalil M.Y., Merz E. Immobilization of MAW in Alkali-Activated Aluminosilicate Binders (Geopolymers), 2002.
17. Bourcier W.L. Affinity Function for Modeling Glass Dissolution Rates. US DOE Report UCRL-JC-131186, 1998.
18. Studsvik and Beijing DYNATECH Co. Ltd. Signed a Framework Agreement to supply Studsvik's Fluid Bed Steam Reforming Technology to China [non-legible source]. <http://www.studsvik.com/nyhetsarkiv/bed-fluid-steam-reforming-agreement---china/> (Referencing date: 18.09.2017).

