

Инженерные решения проблемы РАО

Виталий Узиков, инженер

Проблема радиоактивных отходов вызывает живой интерес у людей как причастных к атомной энергетике, так и не причастных. У последних, может быть даже больше, чем у первых, так как радиофобия на фоне глобальных катастроф в Чернобыле и на Фукусиме вполне объяснимое и оправданное чувство. К сожалению, работа ядерных реакторов деления на уране неизбежно сопровождается производством и накоплением очень опасных для человека радионуклидов. И хотя некоторые из производимых радионуклидов могут приносить людям ощутимую пользу в медицине, науке и технике, с подавляющим большинством этих радионуклидов, которые называют радиоактивными отходами (РАО), человеку лучше никогда не сталкиваться.

И на первый взгляд, изоляция РАО от окружающей среды, в которой обитает человек, не такая уж и сложная задача. Поэтому к некоторым приходит мысль, что просто нужно удалить эти РАО туда, «куда Макар телят не гонял», то есть как можно дальше – глубоко под землю, под дно океана, в вечную мерзлоту или даже в космос, и тогда вопрос с опасными отходами будет решён.

Если не рассматривать экзотические и фантастические предложения избавления от РАО, например, удаление в вечную мерзлоту, в ледники, в жерла вулканов или в космос, то реалистичных вариантов долговременной изоляции РАО остается не так уж и много. Обсуждение этих вариантов строится в основном о том, на какую глубину под землю и в какие геологические формации лучше изолировать РАО того или иного класса опасности. Но перед этим опасные радиоактивные вещества необходимо связать в твердой матрице, которая способна сохранить свои свойства в течение многих столетий и тысячелетий, и лишь затем саму матрицу надежно изолировать от окружающей среды на максимально продолжительное время.

Концепции захоронения низко- и средне активных отходов НСАО развитых стран, таких как Бельгия, Франция, Швейцария, Канада, Германия и США, полагаются на вмещающую породу с низкой проницаемостью, которая является основным барьером для миграции радионуклидов. Например, канадская концепция опирается на множественный геологический барьер, создаваемый вмещающими породами известняка с низкой проницаемостью и лежащими сверху сланцами, также с низкой проницаемостью. Роль, которую любая **инженерная система барьеров (ИСБ)** может играть в ограничении высвобождения и миграции радионуклидов после закрытия хранилища, обычно считается второстепенной. Но при рассмотрении таких концепций для геологических сред, в которых возможен потенциально значительный поток подземных вод, роль **ИСБ** в работе хранилища после закрытия повышается. Воздействие потока грунтовых вод на надежность ИСБ и миграцию радионуклидов после закрытия хранилища требует тщательной оценки надежности, что может привести к необходимости их усиления для удовлетворения требований к характеристикам хранилища после закрытия.

В Бельгии принята концепция утилизации НСАО в туннелях в пластичной глинистой вмещающей породе с использованием контейнеров для отходов, защищенных в бетонных сооружениях для захоронения, которые размещаются в осевом направлении в туннелях, облицованных бетоном. Во Франции концепция предполагает захоронение НСАО в затвердевшей глинистой вмещающей породе в туннелях с контейнерами для отходов, упакованными в бетонные транспортные пакеты, которые укладываются в облицованные бетоном туннели; отдельная зона захоронения выделена для отходов, содержащих органические вещества. По Швейцарской концепции утилизация НСАО должна производиться в туннелях во вмещающих породах мергеля, с контейнерами для отходов, упакованными в бетонные блоки для захоронения, которые укладываются в облицованные бетоном туннели и с газопроницаемым раствором, включенным в качестве засыпки. По японской концепции необходимо производить вывоз в туннель отходов с трансураниевыми элементами для захоронения в стальных контейнерах, которые укладываются в туннели (облицованные бетоном в мягких породах), и с цементным раствором, включенным в качестве засыпки; для некоторых отходов предусмотрен бентонитовый барьер, а отходы, содержащие нитраты, выделяются в отдельную зону захоронения. В Швеции принята концепция захоронения НСАО внутри пещер в кристаллической вмещающей породе с отходами, упакованными в бетон и стальные контейнеры, которые складываются в пещеры (малоактивные отходы) или заливаются в бетонные своды внутри пещер (высокоактивные отходы); пещеры засыпаются щебнем, который действует как гидравлический сепаратор. В принятой Канадой концепции захоронение НСАО должно производиться в известняковой вмещающей породе с размещением НАО и экранированных контейнеров с САО в отдельных помещениях (без последующей засыпки). Концепция Германии предусматривает захоронение НСАО в кавернах глинистых образований, при этом упаковки с отходами размещаются в стальные контейнеры и цементируются, а затем складываются штабелями в кавернах; каверны заливаются раствором.

Однако из-за сложности и высоких затрат на реализацию большинство этих концепций, связанных с использованием геологических структур, всё еще находятся в стадии разработки или больше не разрабатываются в соответствии с первоначальными проектами.

В соответствии с принятым в атомной отрасли принципом ALARA (сокращение от *As Low As Reasonably Achievable*), сформулированным как принцип оптимизации доз еще в 1954 году Международной Комиссией по Радиологической защите с целью минимизации вредного воздействия ионизирующей радиации, в сложившихся экономических условиях в практической деятельности по обезвреживанию РАО для снижения затрат нужно больше внимания уделять инженерной системе барьеров, в первую очередь в приповерхностных пунктах захоронения, как наименее затратных.

Отходы должны быть пассивно безопасными – жидкости и шламы переведены в твердую форму. Также необходимо иммобилизовать в матрицы твердые частицы и фрагментированные твердые отходы. В качестве иммобилизационных матриц рассматриваются вяжущие материалы, битумы, органические полимеры, продукты высокотемпературного сжигания и плавления, фосфатная керамика, неорганические полимеры с составом, близким к синтетическим цеолитам, стеклам, стеклокерамике и

природным кристаллическим минеральным фазам. Но на практике обычно иммобилизация отходов выполняется с использованием *цементных растворов*, поскольку они оказались *универсальными, надежными и удобными*, хотя другие матрицы для иммобилизации, такие как стекло или полимеры, могут лучше подходить для некоторых форм отходов. Жидкие или иловые отходы цементируются для утилизации с образованием относительно однородной формы – цементного компаунда, который может размещаться в самозащитных упаковках, чтобы упростить процедуру обращения с отходами в хранилище. Однако такая защита приводит к увеличению размера и веса упаковки, увеличению объема хранилища и существенному увеличению затрат на утилизацию.

В качестве оптимального можно рассмотреть вариант, включающий интеграцию многоразового экранирования (транспортно-упаковочные комплекты – ТУК) и самозащиты, чтобы минимизировать объем утилизируемого экранирующего материала. Многоразовая защита должна использоваться лишь для погрузочно-разгрузочных и транспортных операций за пределами хранилища, а в хранилище должны укладываться неэкранированные упаковки по технологии удаленного обращения (без непосредственного участия человека), снимающей ограничения по пределу мощности дозы на небольшом расстоянии от упаковки.

Для этого необходимо разработать стандартные (унифицированные) упаковки для отходов САО и НАО с целью упрощения процедур контроля качества, транспортировки и обращения с заполненными упаковками, а также для оптимизации операций с учетом геометрической идентичности упаковок. При решении вопроса об оптимальных размерах неэкранированных упаковок необходимо исходить из следующих соображений:

- упаковки должны иметь низкую стоимость;
- технология производства упаковок должна быть простой и доступной для изготовления на обычном оборудовании;
- оболочка упаковок должна быть металлической, обеспечивать полную герметичность и легко поддаваться поверхностной дезактивации;
- объем заполнения упаковок должен обеспечивать отсутствие проблем с разогревом при гидратации цементной смеси;
- после окончательной изоляции каждая упаковка должна обеспечивать надежный барьер, препятствующий миграции радионуклидов наружу в течение столетий и тысячелетий;
- весовые и геометрические параметры упаковки должны обеспечивать проведение транспортно-технологических операций по технологии удаленного обращения, т.е. без непосредственного нахождения человека вблизи упаковки;
- укладка упаковок в пункте окончательной изоляции должна обеспечивать максимальную плотность отвержденных РАО на единицу полезного объема хранилища;
- структура инженерной системы барьеров, препятствующих миграции опасных радионуклидов в окружающую среду, должна быть многослойной и построенной

на базе материалов, сохраняющих свои изолирующие, фильтрующие и сорбирующие свойства в течение многих тысячелетий;

- типовые упаковки должны быть пригодны для окончательной изоляции в одном пункте захоронения отвержденных РАО различных классов радиационной опасности.

Принимая во внимание перечисленные желательные параметры неэкранированных упаковок, предлагается рассмотреть последовательность этапов обезвреживания накопившихся РАО, и в первую очередь, это касается проблемы жидких радиоактивных отходов (ЖРО). Как было сказано выше, на первом этапе жидкости и шламы должны быть переведены в отвержденное состояние, как правило, методом цементирования. Но при реализации этого этапа необходимо сначала сконцентрировать ЖРО до научно обоснованных (с использованием экономико-математических моделей) концентраций солей – 700-800 г/л.

На этом этапе возникает первая техническая проблема – отсутствие технологии упаривания ЖРО до таких концентраций. Хотя это не совсем так. Если быть точнее, используемые для выпаривания ЖРО выпарные аппараты с вынесенной греющей камерой производительностью 6 тонн ЖРО в час не без проблем, но все же могут упаривать до таких концентраций. Однако хранить такой концентрированный кубовый остаток в больших емкостях хранилища (ХЖРО) становится невозможным, так как выпадающие в осадок солевые отложения в нижней части превращаются в камень и емкость теряет свои функциональные свойства. Другой проблемой в технологии концентрирования ЖРО является то, что такие большие и сложные выпарные установки с большим расходом греющего пара могут позволить себе далеко не все предприятия, производящие ЖРО, а лишь такие, как АЭС.

- Поэтому первое предложение в технологической цепочке обезвреживания ЖРО касается создания простых выпарных аппаратов, с возможностью их применения на самых разных объектах – от предприятий ядерного топливного цикла до спецпрачечных и радиологических медицинских учреждений.
- Второе предложение касается отказа от хранения концентрата ЖРО в емкостях и его перевода в отвержденное состояние (цементирование) сразу после получения концентрата.
- Полученным в смесителе цементным компаундом сразу заполняется металлическая неэкранированная упаковка, после чего герметизируется. Все операции по созданию упаковки с отвержденными ЖРО и дозиметрические замеры для её паспортизации проводятся дистанционно, без участия человека.
- Готовая упаковка отправляется на выдержку в хранилище, а полученные при паспортизации данные по этой упаковке направляются в единую базу данных национального оператора РАО (НО РАО).
- При формировании пункта окончательной изоляции НО РАО, опираясь на логистическую схему оптимальной изоляции готовых и выдержанных упаковок,

посылает запрос на предприятие, уведомляя его о готовности принять определенное количество упаковок разного класса радиационной опасности.

- Организуется поставка упаковок в экранирующих транспортно-упаковочных комплектах от предприятия к пункту окончательной изоляции.
- НО РАО обеспечивает дистанционную укладку упаковок в хранилище в соответствии с принципом вложенности, когда упаковки с большим уровнем радиационной опасности находятся ближе к центру объема захоронения, чем упаковки с меньшим уровнем радиационной опасности. Технологические зазоры между упаковками заполняются бентонитовой глиной и, возможно, листовым стеклом, обеспечивая долговременный надежный барьер от миграции радионуклидов по объему кладки.
- Для повышения долговременной надежности хранилища по периферии кладки размещается множество слоев упаковок с очень низко активными отходами (ОНАО), обеспечивая их окончательную изоляцию согласно нормативным документам и одновременно являясь частью инженерной системы барьеров от выхода опасных радионуклидов в окружающую среду.

Схематично этапы обезвреживания ЖРО приведены на Рисунке 1.

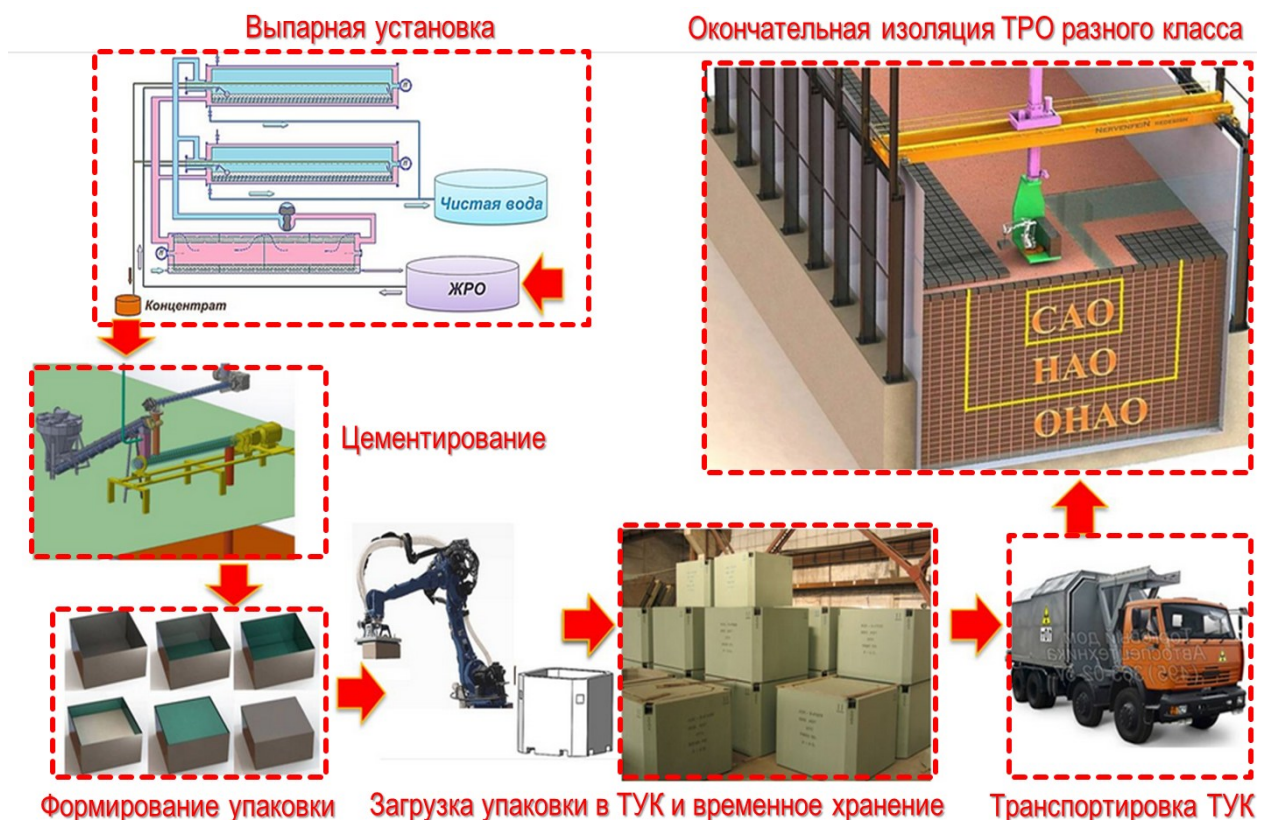


Рисунок 1 – Этапы обезвреживания ЖРО

Рассмотрим технические стороны реализации этих этапов. Наиболее проблемным на сегодня является этап концентрирования ЖРО методом упаривания. Это вызвано сложным химическим и радионуклидным составом растворов, образованием отложений на теплообменных поверхностях и высокими дозовыми нагрузками на персонал при

очистке теплообменных трубок от отложений. Поэтому встал вопрос о создании выпарных аппаратов, в которых греющие поверхности очищаются непрерывно в процессе работы установки. Такие установки предлагается создать на базе барабанов пленочного испарения, прототипом которых можно считать широко используемые в лабораториях роторные испарители (Рисунок 2) .

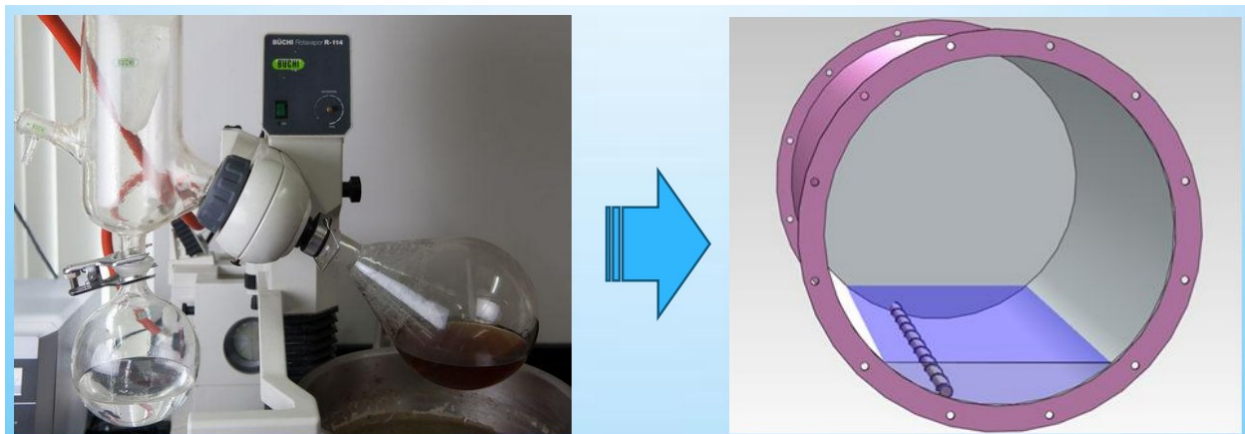


Рисунок 2 – Прототип барабана пленочного испарения

Переход от находящейся под уклоном стеклянной колбы к металлическому горизонтальному барабану позволяет организовать непрерывную очистку греющей поверхности от отложений под уровнем жидкости. Для этого можно использовать тяжелый стержень с навивкой, которые обеспечивает не только удаление отложений с поверхности, но и их транспортировку к месту выгрузки из-за шнековых свойств навивки при вращении стержня при невозможности его осевого перемещения. На Рисунке 3 приведен продольный разрез барабана пленочного испарения, обогреваемого паром и показан стержень с навивкой для очистки греющей поверхности и транспортировки шлама к месту выгрузки.

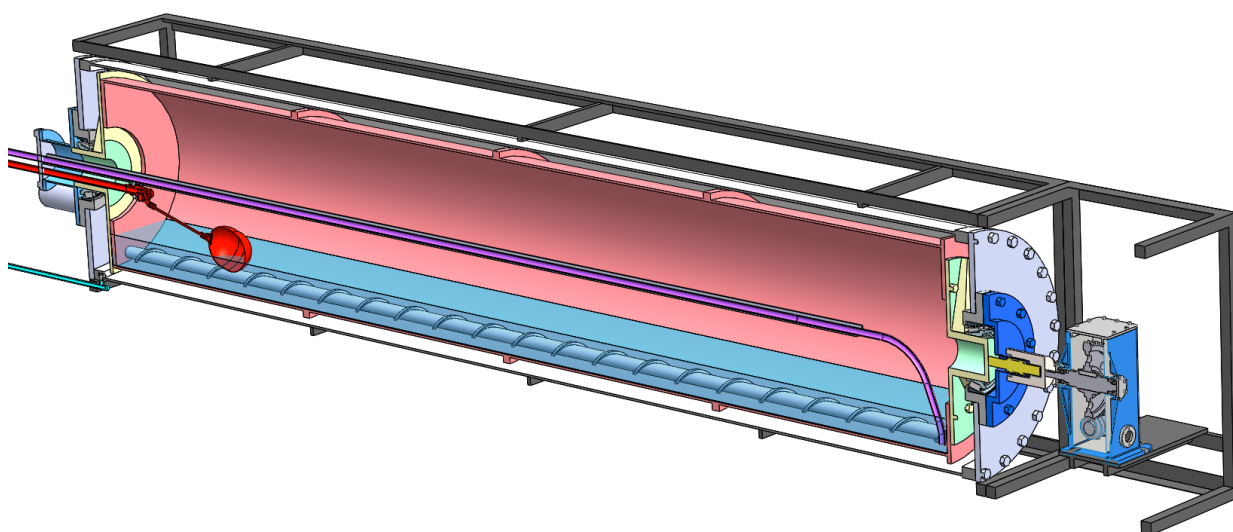


Рисунок 3 – Барабан пленочного испарения с паровым обогревом и шнековой конструкцией устройства для очистки греющей поверхности и транспортировки шлама к месту выгрузки

По какой-то причине такая конструкция устройства очистки от отложений у многих вызывает большое недоверие, поэтому на Рисунке 4 приведен продольный разрез барабана пленочного испарения с вариантом скребкового устройства для очистки греющей поверхности и транспортировки шлама к месту выгрузки. Но этот вариант потребует существенно большего крутящего момента для обеспечения вращения барабана.

С позиции теплотехники это обычный теплообменный аппарат с теплопередачей *испарение-конденсация* через стенку и с наличием движущихся частей, что можно отнести к недостаткам. Однако именно вращение барабана позволяет обеспечивать постоянную очистку греющей поверхности от отложений солей, поэтому данное усложнение можно считать оправданным. Пленочный характер испарения с поверхности позволяет избавиться или минимизировать капельно-аэрозольный унос, что крайне важно при концентрировании ЖРО для получения чистой воды, свободной от радиационного контроля.

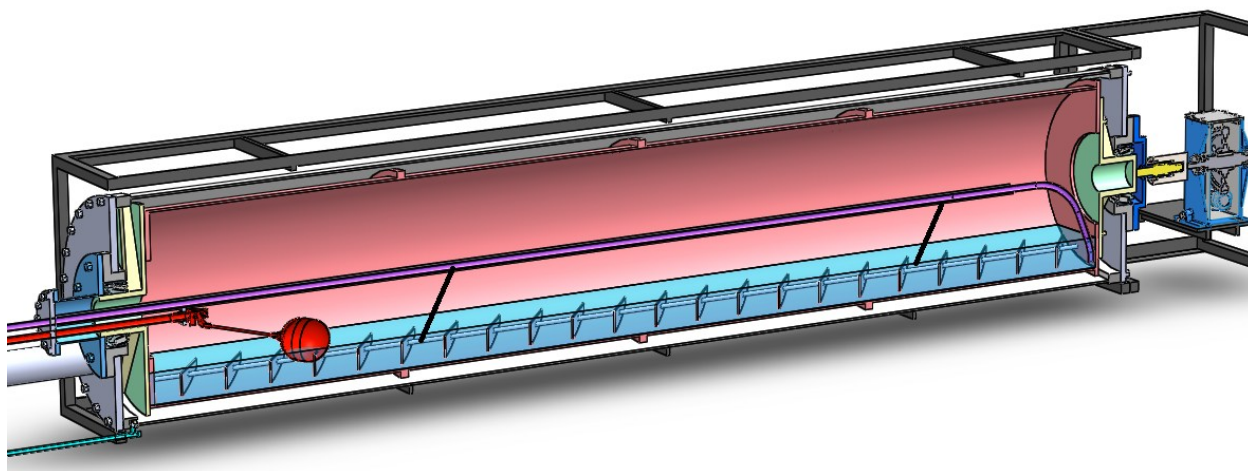


Рисунок 4 – Барабан пленочного испарения с паровым обогревом и с вариантом скребкового устройства для очистки греющей поверхности и транспортировки шлама к месту выгрузки

И все же при упаривании радиоактивных вод (например, из спецрачечных), содержащих поверхностно-активные вещества (ПАВ), избежать пенообразования вряд ли удастся. При лопании мыльные пузырьки создают в паре облако аэрозолей и загрязняют его. Поэтому для дополнительной очистки пара в выпарных установках концентрирования ЖРО предлагается применять массообменные аппараты насадочного типа барабанной конструкции. Самый простой одноступенчатый насадочный абсорбер приведен на Рисунке 5.

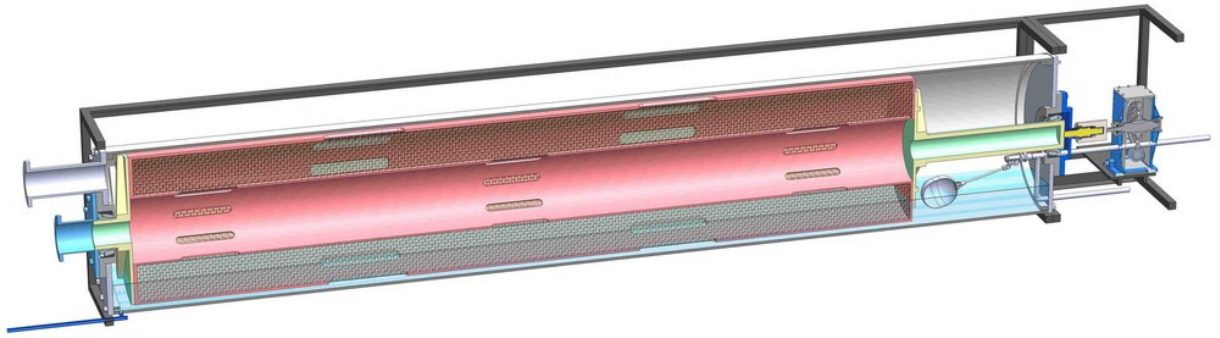


Рисунок 5 – Одноступенчатый барабанный насадочный абсорбер

Принцип работы этого абсорбера достаточно прост – загрязненный аэрозолями пар, проходя через слой насадок (например, спирально призматические насадки) очищается, передавая загрязнения чистой воде (флегме), которая протекает через массообменный аппарат. Загрязненная аэрозолями флегма затем поступает на упаривание в ту же выпарную установку. Для повышения качества очистки пара этот абсорбер можно сделать многоступенчатым, как показано на упрощенной схеме выпарной установки, работающей по принципу рекомпрессии пара в насосе Рутса (Рисунок 6). Там же приведены относительные теплотехнические параметры выпарной установки в пересчете на один погонный метр стального выпарного барабана диаметром 500 мм с толщиной стенки 6 мм.

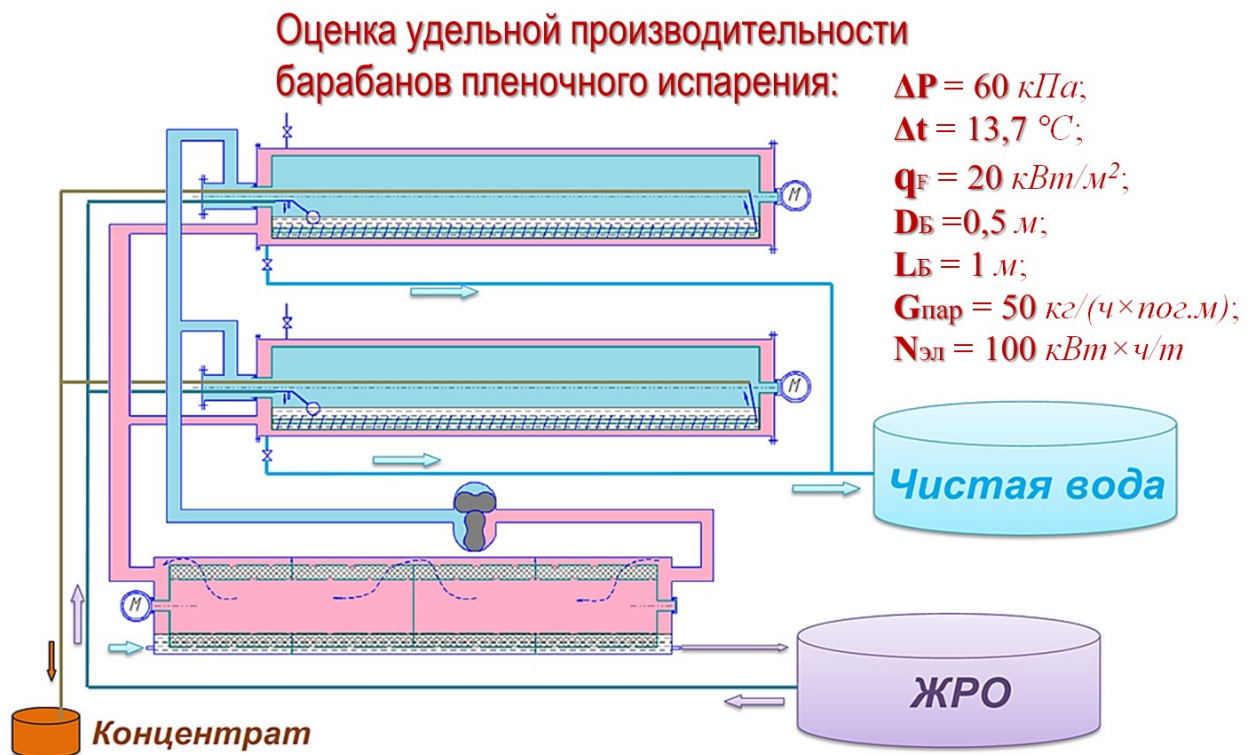


Рисунок 6 – Упрощенная схема выпарной установки, работающей по технологии рекомпрессии пара в насосе Рутса с многоступенчатой очисткой пара от аэрозолей

Эта схема достаточно проста и наглядна: вторичный пар из выпарных барабанов (обозначен голубым цветом) поступает в насос Рутса, где происходит его сжатие и повышение температуры (розовый цвет). После прохождения очистки в многоступенчатом барабанном насадочном абсорбере он поступает в греющую рубашку выпарных барабанов, на которых конденсируется и отводится в бак чистой воды. В выпарные барабаны поступает ЖРО, компенсируя потерю воды из барабана, уносимой вторичным паром. При достижении заданной концентрации раствора 700-800 г/л концентрат периодически отводится в вакуумируемую емкость, используя сифонный эффект.

Следует отметить, что работа с радиоактивными средами требует особой герметизации оборудования, поэтому приводы вращения желательно оснащать магнитными муфтами. Однако они достаточно дороги и усложняют установку. Поэтому для приведения во вращение выпарных барабанов и барабанного абсорбера можно использовать кинетическую энергию пара. Для этого привод вращения барабана выполняется в виде пневматического двигателя турбинного типа, в котором роль лопастей выполняют ребра на поверхности барабанной конструкции, а подвод греющего пара в цилиндрический корпус производится тангенциально образующей траектории вращения ребер (Рисунок 7).

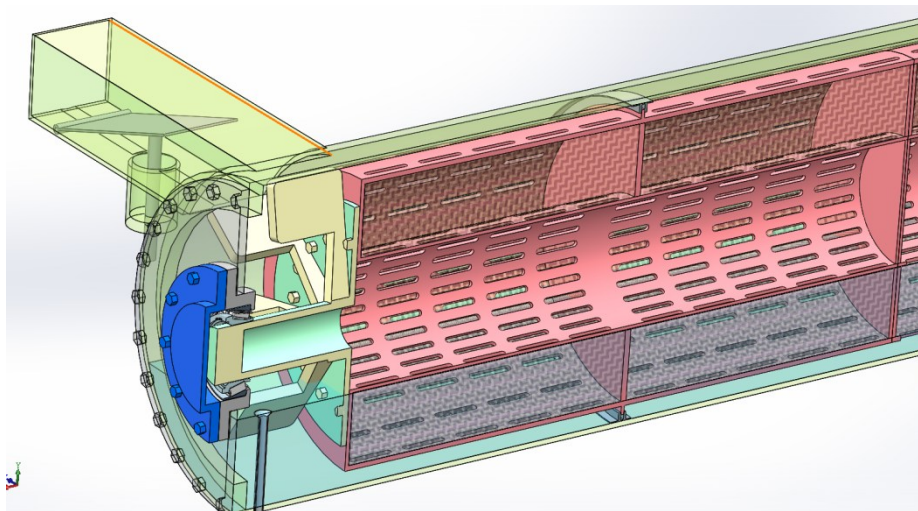


Рисунок 7 – Привод вращения барабанной конструкции в виде пневматического двигателя турбинного типа с возможностью регулирования скорости вращения на примере барабанного насадочного абсорбера

Изменением проходного сечения в тангенциальном патрубке (Рисунок 7) можно регулировать кинетическую энергию поступающего на лопасти пара, регулируя тем самым скорость вращения.

Полученный концентрат ЖРО может быть сразу отвержден в цементной матрице. При цементировании можно применять как смесители непрерывного действия, так и порционные смесители. Преимуществом смесителей непрерывного действия является их компактность, простота обслуживания, малая потребляемая мощность, отсутствие существенных нагрузок на привод и, следовательно, повышенная надежность. Схема

установки цементирования со смесителем непрерывного действия приведена на Рисунке 8, а эскиз установки и смесителя со схемой перемешивающих элементов – на Рисунке 9.

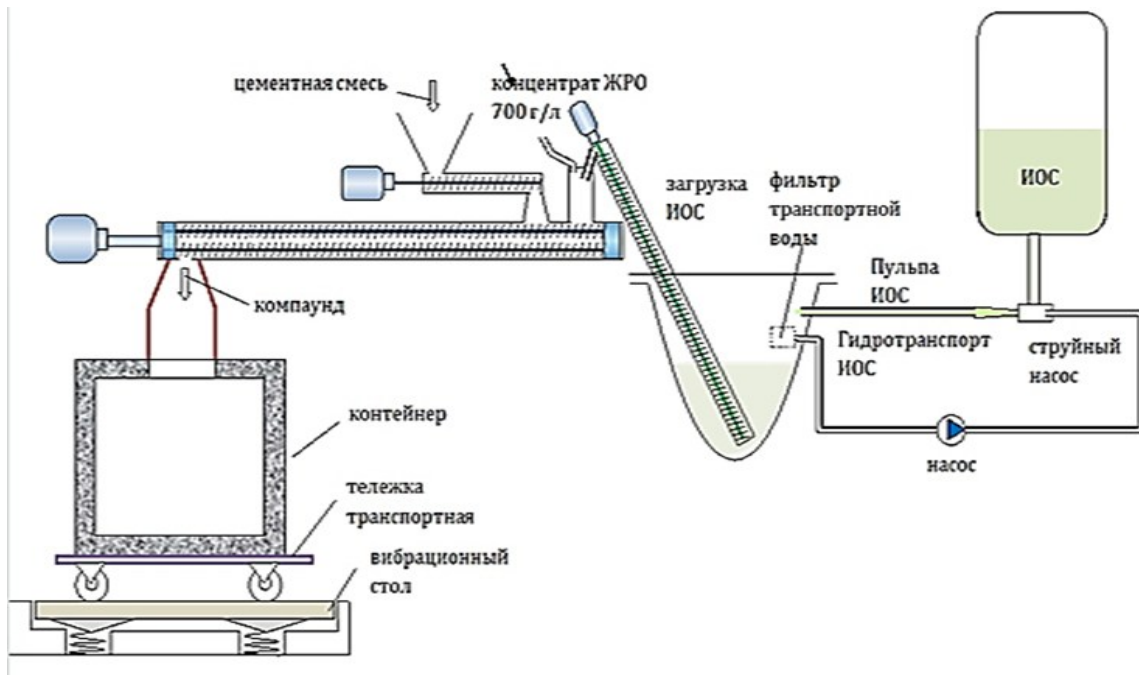


Рисунок 8 – Схема установки цементирования со смесителем непрерывного действия

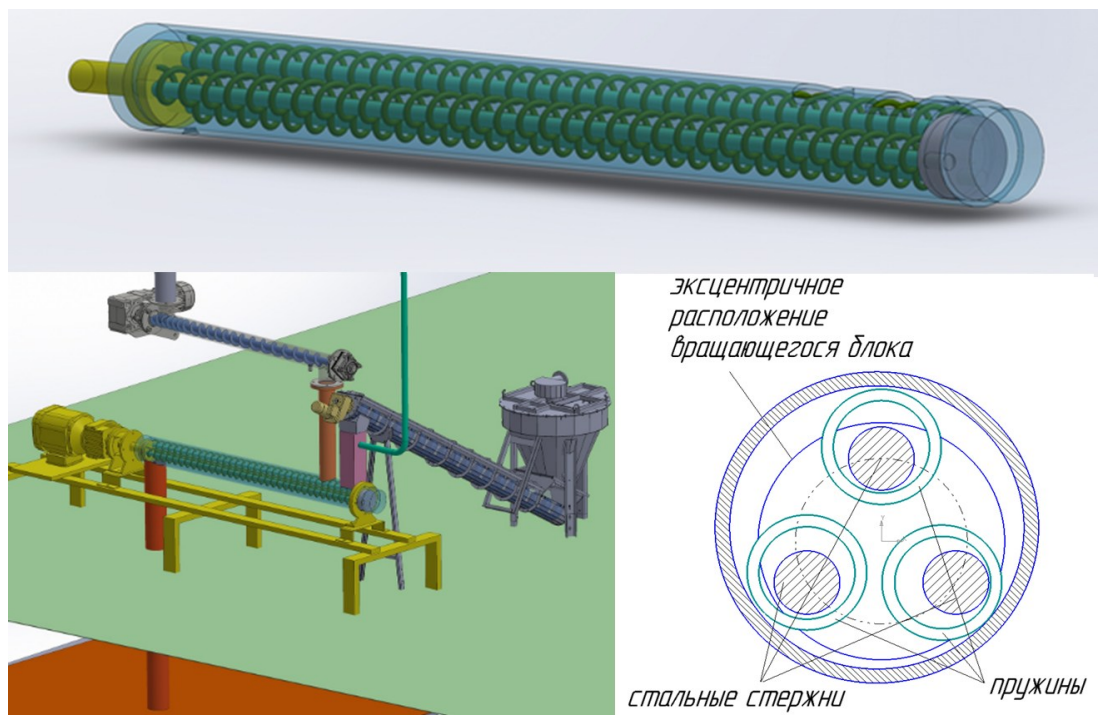


Рисунок 9 – Вид установки цементирования со смесителем непрерывного действия и вид смесителя со схемой перемешивающих элементов.

После получения цементного компаунда в смесителе производится его загрузка в экранированную или неэкранированную упаковку для последующей окончательной изоляции. Предлагается рассмотреть вариант неэкранированных стальных упаковок в форме прямоугольного параллелепипеда относительно небольших размеров, рассчитанных на использование при транспортно-технологических операциях вакуумных захватов (Рисунок 10).

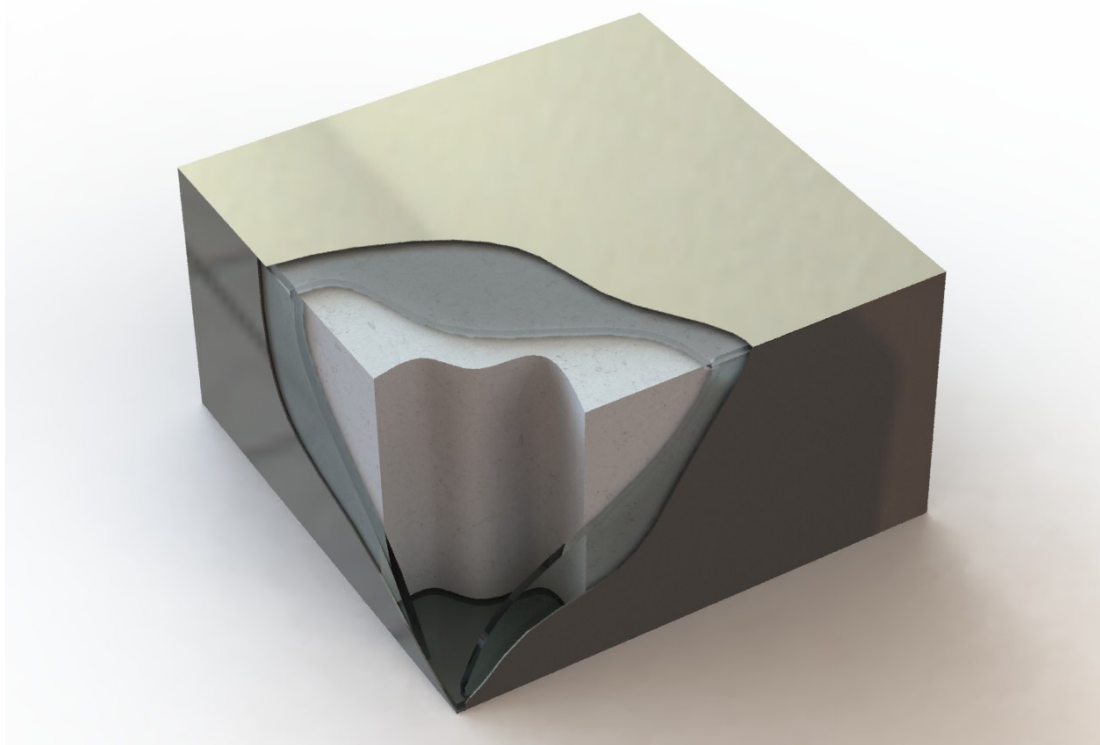


Рисунок 10 – Структура металлической упаковки цементного компаунда с дополнительным слоем листового стекла

В этом случае высота упаковок не должна превышать значения, определяемого по формуле

$$h_{\text{ЕУ}} \leq 0,8 \times \frac{(P_{\text{ат}} - P_{\text{вак}})F_{\text{вак}}}{F_{\text{ЕУ}} \rho_{\text{ЕУ}}}$$

где $h_{\text{ЕУ}}$ – максимальная высота единичной упаковки, см;

$F_{\text{ЕУ}}$ – площадь основания призмы ЕУ, см²;

$F_{\text{вак}}$ – площадь вакуумного захвата, см²;

$P_{\text{вак}}$ – давление вакуумирования, кг/см²;

$P_{\text{ат}}$ – давление атмосферное, кг/см²;

$\rho_{\text{ЕУ}}$ – средняя плотность единичной упаковки, кг/см³.

Преимуществом таких упаковок является:

- низкая стоимость и доступность материалов упаковки;

- простота технологии изготовления корпуса;
- простота транспортно-технологических операций при использовании вакуумных захватов;
- простота технологии формирования загруженной упаковки;
- длительный срок защиты от миграции радионуклидов из упаковки за счет наличия стекла;
- множественность надежных долговременных барьеров из стекла и бентонитовой глины, препятствующих миграции опасных радионуклидов внутри кладки пункта окончательной изоляции РАО.

Простота изготовления таких упаковок и простота транспортно-технологических операций при использовании вакуумных захватов иллюстрируются Рисунком 11.

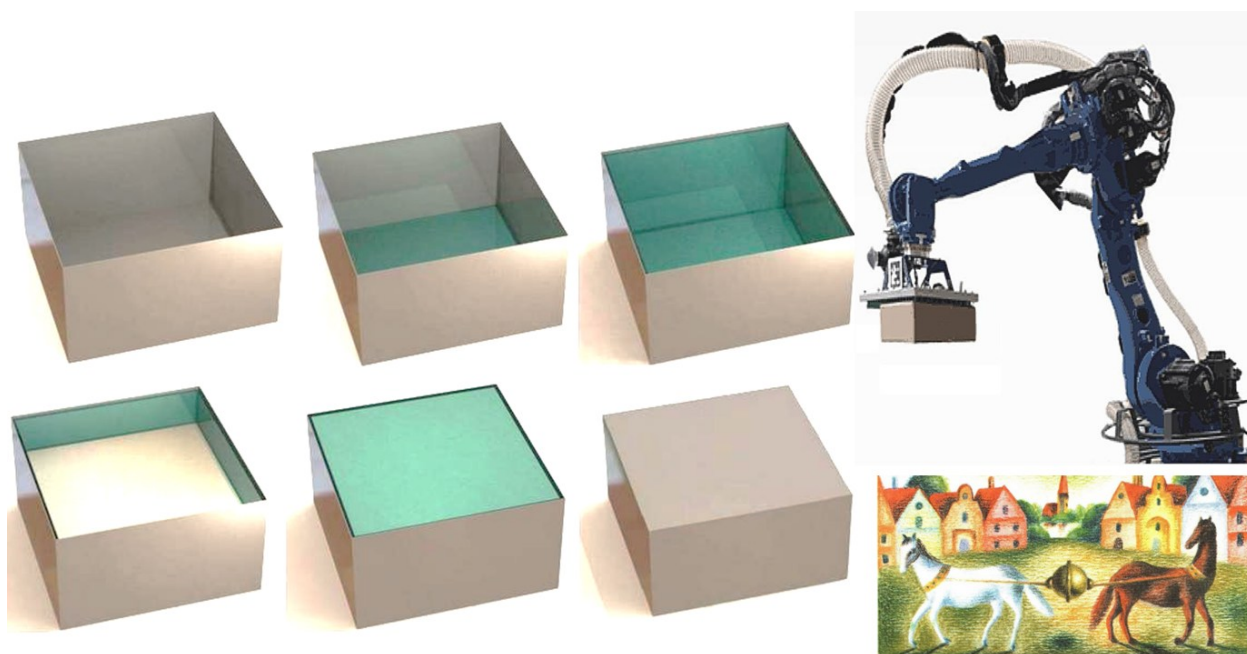


Рисунок 11 – Иллюстрация технологии формирования упаковки с цементным компаундом и транспортно-технологических операций с использованием вакуумных захватов

Несмотря на приведенные расчеты, вполне понятны сомнения в надежности вакуумных захватов. Поэтому можно рассмотреть вариант с обычными захватами (Рисунок 12), но при формировании кладки захватные крюки на упаковке лучше удалить, а это приведет к увеличению технологических операций, да и сама упаковка будет дороже.

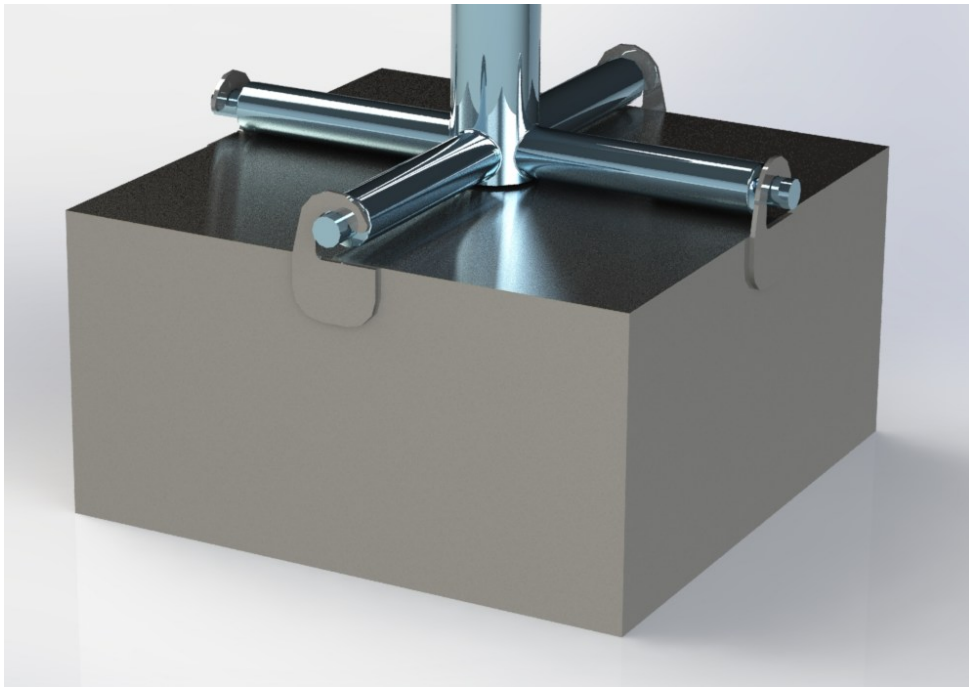


Рисунок 12 – Металлическая упаковка цементного компаунда с механическим захватом

После временного хранения готовых упаковок на предприятии по запросу национального оператора РАО оговоренное количество упаковок с отходами САО, НАО и ОНАО транспортируются в транспортно-упаковочных комплексах в пункт окончательной изоляции. В качестве примера на Рисунке 13 показана структура размещения упаковок разного класса радиационной опасности в приповерхностном пункте захоронения радиоактивных отходов, оснащённом мостовым краном с грузовой тележкой, на которой установлен промышленный манипулятор, оснащённый захватом, позволяющим производить транспортно-технологические операции с металлическими упаковками цементного компаунда. Упаковки дистанционно укладываются в пункте захоронения в соответствии с принципом вложенности, когда упаковки с более высоким уровнем радиационной опасности для окружающей среды размещаются ближе к центру кладки, чем упаковки с более низким уровнем радиационной опасности. На периферии кладки размещаются множество слоев с очень низким уровнем радиоактивности (ОНАО), играющих важную роль в инженерной системе барьеров для создания надежной зоны долговременной защиты от миграции в окружающую среду опасных радионуклидов из центра кладки.

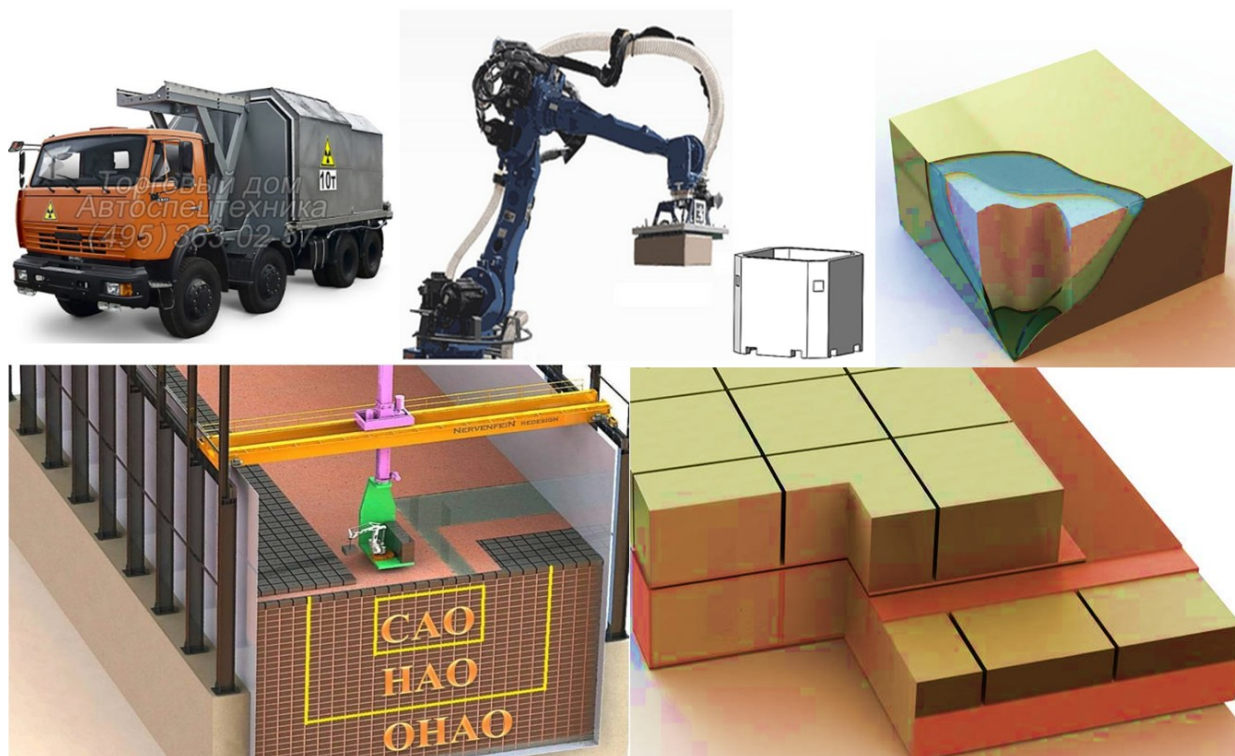


Рисунок 13 – Технология окончательной изоляции упаковок с цементным компаундом разного класса радиационной опасности в приповерхностном пункте захоронения РАО

Такая структура кладки позволяет создать комплексный пункт окончательной изоляции для РАО разного класса, отказавшись от дорогостоящих проектов подземных сооружений для среднеактивных и долгоживущих РАО, что полностью соответствует принципу ALARA в сегодняшних экономических условиях России.

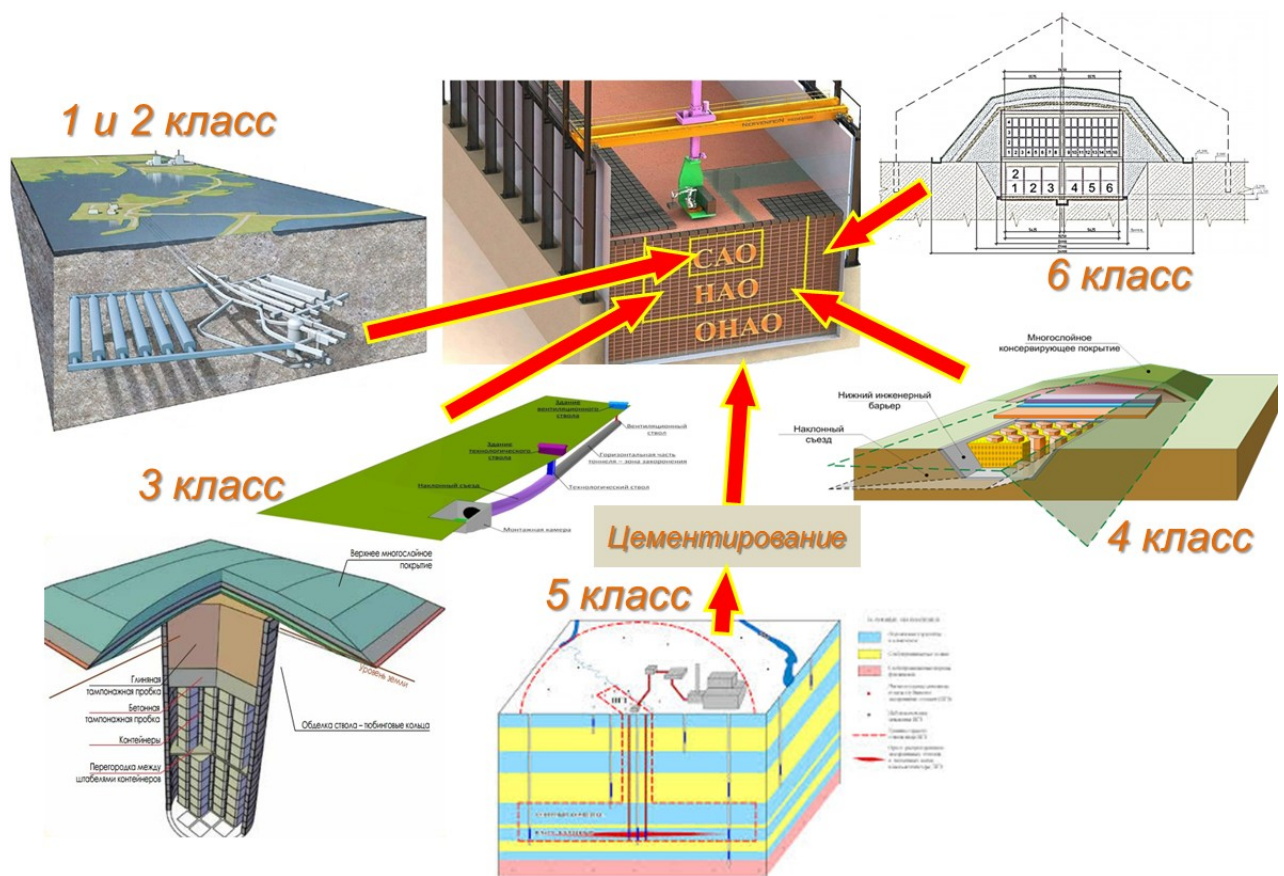


Рисунок 14 – Создание комплексного пункта окончательной изоляции для РАО разного класса как альтернатива дорогостоящим глубинным захоронениям

Основные положения этой концепции обращения с РАО были представлены командой студентов ДИТИ НИЯУ МИФИ на отраслевом турнире ТЕМП-2020 и команда вышла в финал. Это стало причиной того, что руководство Госкорпорации «Росатом» (скорее всего в лице Юрия Александровича Оленина) проявили интерес к этому направлению работ. И это обнадеживает. Хотелось бы пожелать, чтобы этот интерес не угас и высказанные выше предложения по совершенствованию технологии обращения с РАО стали реализовываться на практике.