

УДК 621.039-78:539.12.043

В. З. Андриевский<sup>1</sup>, В. Н. Васильченко<sup>2</sup>, Я. А. Жигалов<sup>2</sup>, Г. А. Сандул<sup>2</sup><sup>1</sup> СП ЧАО «Украинский завод по производству ядерного топлива», г. Киев<sup>2</sup> ГП «Государственный научно-инженерный центр систем контроля и аварийного реагирования», г. Киев

### НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ СИСТЕМЫ “КОНТЕЙНЕР+РАДИОАКТИВНЫЕ ОТХОДЫ” ДЛЯ ХРАНЕНИЯ И ЗАХОРОНЕНИЯ ДОЛГОСУЩЕСТВУЮЩИХ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ

Рассмотрены вопросы влияния негативных факторов внешней окружающей среды на защитные свойства железобетонных контейнеров, предназначенных для хранения (захоронения) долгосуществующих радиоактивных отходов (РАО), а также отдельные концептуальные вопросы складирования (установки) и расположения контейнеров РАО в хранилищах, которые могут существенно повлиять на долговечность контейнеров при их эксплуатации. Предложена математическая формализация, позволяющая в общем виде выполнять анализ потенциального влияния климатических, гидрогеологических и других факторов окружающей среды на основные эксплуатационные характеристики системы “контейнер+РАО”.

**Ключевые слова:** контейнер, защитный барьер, радиоактивные отходы, ядерная энергетика.

Защитные функции различных защитных барьеров (ЗБ), в частности контейнеров-ЗБ, существенно зависят от условий их эксплуатации. В предлагаемой статье, как и в предыдущих публикациях данного цикла [1—3], речь идет о наиболее распространенных типичных ЗБ — железобетонных контейнерах, предназначенных для захоронения долгосуществующих среднеживущих радиоактивных отходов [4].

Ранее в [1] были рассмотрены факторы интегральной деградации контейнеров-ЗБ и построена соответствующая функция их деградации

$$\overline{D}^{ЗБ}(t) = F \left[ D^{\overline{OC}}(t), D^{ЗБ}(t), D^{\text{ОБСЛ}}(t), D^{\text{PM}}(t), t \right],$$

одним из аргументов которой является деградация  $D^{\overline{OC}}(t)$ , возникающая под влиянием внешней по отношению к периметру контейнера окружающей среды ( $\overline{OC}$ ). При этом  $D^{ЗБ}(t)$  — деградация проектных (запланированных) свойств контейнеров со временем;  $D^{\text{ОБСЛ}}(t)$ <sup>1</sup> — деградация свойств контейнеров как следствие отсутствия или недостаточного их обслуживания;  $D^{\text{PM}}(t)$  — деградация свойств контейнеров как следствие действия на них ионизирующего излучения радиационных материалов РАО.

В [1] также было принято приближение, когда в данной модели рассматривались лишь два аргумента приведенной функции:  $D^{ЗБ}(t)$  и  $D^{\text{PM}}(t)$ , приняв, что контейнеры расположены на захоронение (постоянное хранение) в обвалованном приповерхностном хранилище в полном соответствии с техническими условиями; при этом их обслуживание в хранилище регламентом не предусмотрено и влиянием на них внешней по отношению к периметру контейнера окружающей среды можно пренебречь.

Однако существует ситуация, когда и на АЭС, и в системе специализированных хранилищ РАО установленные на бетонное основание штабелями контейнеры с РАО (по 4—5 штук один на другом) десятки лет хранятся под открытым небом и в полной мере подвержены воздействию  $\overline{OC}$ .

В этой связи анализ негативных факторов внешней окружающей среды, влияющих на защитные функции контейнеров при их эксплуатации, — весьма актуальная задача. Как и при решении любой задачи, прежде всего, необходимо разработать определенный формальный аппарат, который бы позволил провести такой анализ и оценить соответствующие риски, т. е. вероятности воздействия различных негативных факторов влияния и их последствия.

Сложность решения подобной задачи состоит в том, что в данном случае речь должна идти не только о контейнерах как таковых, но и о хранилище, о системе используемого оборудования, технологии размещения контейнеров в хранилище и т. д. Ее решение затрагивает много различных аспектов, например:

- надежность систем и оборудования;
- вопросы организации процессо-ориентированной деятельности, связанной с перемещением и складированием контейнеров;
- безопасность и аварийную готовность;
- расчет мощности эквивалентной дозы  $\gamma$ -излучения (МЭД) в случае прогнозируемых аварий;
- вопросы устойчивости рассматриваемых общей системы и отдельных ее подсистем и др., где в качестве частных систем можно рассматривать, например, следующие системы и соответствующие им подсистемы:

- а) контейнер;
- б) контейнер+РАО;
- в) контейнер+РАО+хранилище РАО;

<sup>1</sup> Обслуживание контейнеров после изготовления “до” их применения по назначению и “после”.

г) контейнер+РАО+оборудование, используемое при складировании;

д) контейнер+РАО+плита-основание, где располагаются контейнеры, и др.

При этом вначале нужно решить более частную задачу: обозначить некоторые потенциальные источники опасности, которые оказывают негативное влияние на контейнеры как непосредственно, так и опосредовано, при эксплуатации хранилищ РАО (временное или постоянное хранение или захоронение).

Решению данной частной задачи и посвящена настоящая работа.

**Формализация понятия “условия эксплуатации”.** Прежде всего, рассмотрим понятие “условия эксплуатации” в применении к данным контейнерам (система “контейнер+РАО”).

Для решения сформулированной выше задачи в общем виде следует определить, весьма условно, данное понятие в пространстве трех измерений (трех составляющих)<sup>1</sup>:

1. Влияние факторов  $\overline{OC}$ :

а) климатические (погодные) факторы;

б) гидрогеологические факторы и др.

2. Влияние радиационной нагрузки — действие излучения радионуклидов РАО на материал контейнера.

3. Процесс складирования (установки) контейнеров в хранилище.

Отметим: все, что касается механизмов влияния радиационного излучения РАО, находящихся внутри железобетонного контейнера, на его прочностные характеристики (долговечность), ввиду сложности самой задачи и значительного объема информации, используемой для ее решения, предполагается рассмотреть в отдельной работе, а в данной статье мерность пространства рассмотрения задачи будет понижена до двух составляющих — влияния факторов  $\overline{OC}$  и процесса складирования (установки) контейнеров в хранилище.

В соответствии с приведенной схемой дифференциации понятия “условия эксплуатации” уместно подробнее рассмотреть некоторые факторы влияния  $\overline{OC}$  на систему “контейнер+РАО+хранилище РАО”, например гидрогеологические.

Рассмотрим такой гидрологический фактор, как подземные воды.

Подземные воды бывают двух типов:

1. Воды, имеющие сток к руслам рек.

2. Воды, не имеющие стока, так называемые водяные линзы, которые могут мигрировать — “выдавливаться” из одного места в другое, разделяться

на части и объединяться спонтанно, прежде всего, при антропогенном вмешательстве в геологическую среду. Пополнение водой водяных линз происходит в основном за счет сезонных осадков (дожди, таяние снега) и просачивания вод промышленных и бытовых канализаций.

И подземные воды, имеющие сток, и, в особенности, водяные линзы могут быть загрязнены различными химическими соединениями природного и антропогенного характера, негативно влияющими на бетонные сооружения хранилищ или их элементов.

Изучая влияние факторов  $\overline{OC}$  на контейнеры и на хранилище РАО в целом, необходимо одновременно рассматривать как климатические, так и гидрогеологические факторы, поскольку они тесно связаны между собой (промерзание почвы в зимний период и оттаивание ее в весенне-летний период и т. д.). Степень взаимосвязи между погодными и гидрогеологическими факторами как реальными условиями эксплуатации контейнеров существенно зависит от времени года.

Качество  $\overline{OC}$ , влияющей на процесс эксплуатации контейнеров, усредненное по определенному интервалу времени  $\Delta t$ , упрощая ситуацию, можно представить в виде простой суммы ее показателей, актуальных с точки зрения поставленной задачи, т. е. как некоторое линейное приближение:

$$Q_{\Delta t}^{\overline{OC}} = \sum_i^n \alpha_i N_i,$$

где  $\Delta t$  в данном случае характеризует некоторый временной интервал, который можно соотнести, например, со временами года: зима, весна, лето, осень или каким-либо любым другим временным интервалом, например каждым месяцем года;  $N_i$  — показатели факторов  $\overline{OC}$  (условно не взаимозависимые), которые являются относительными к среднестатистическим значениям соответствующих показателей за период времени  $\Delta t$ ;  $\alpha_i$  — статистический вес каждого показателя;  $n$  — количество выбранных показателей;  $i = 1, 2, 3, \dots, n$ .

Кроме того, предположим, что в рамках границ каждого интервала  $\Delta t$  качество  $\overline{OC}$  остается неизменным, т. е.  $Q_{\Delta t}^{\overline{OC}} = \text{const}$ .

Такой подход позволяет составить “временную карту условий эксплуатации контейнеров”<sup>2</sup>, что, в свою очередь, используя статистические данные, позволяет прогнозировать и оценивать вероятность действия негативных факторов (их сочетания) на эксплуатацию контейнеров во времени.

<sup>1</sup> Данная мерность пространства выбрана для большей наглядности. В зависимости от поставленной задачи она может быть увеличена или уменьшена.

<sup>2</sup> Такого рода “карты” составляют для всех объектов с особыми (повышенными требованиями) условиями эксплуатации, например для взлетных полос аэродромов, гидросооружений.

При этом мы постулируем, что контейнеры абсолютно идентичны и влияние условий эксплуатации на все контейнеры совершенно одинаково.

Например, рассмотрим представление факторов  $\overline{OC}$  (определяющих ее качество), действующих на контейнеры в летний период:

$$Q_{\text{лето}}^{\overline{OC}} = \alpha_1 N_1 + \alpha_2 N_2 + \alpha_3 N_3 + \alpha_4 N_4 + \dots, \quad (1)$$

где  $N_1$  — относительный показатель среднесуточной температуры воздуха;  $N_2$  — относительный показатель влажности воздуха;  $N_3$  — число дождливых дней или наводнений за данный период;  $N_4$  — относительный показатель колебания уровня грунтовых вод;  $N_5$  — количество смерчей, ураганов, суховеев;  $N_6$  — количество землетрясений;  $N_7$  — относительный показатель, характеризующий радиационную обстановку (МЭД), и др.

Коэффициенты  $\alpha_i$ , которые определяют вклад каждого из показателей в  $Q_{\text{лето}}^{\overline{OC}}$ , выбирают на основании экспериментальных данных и (или) экспертными методами (статистика наблюдений, опыт и др.), учитывая выполнение условия нормировки: в каждом рассматриваемом временном интервале  $\Delta t$  коэффициенты  $\alpha_i$  подчиняются общему правилу

$$\sum_{i=1}^n \alpha_i = 1.$$

Очевидно, что колебания уровня грунтовых вод зависят от количества дождливых дней за данный период, т. е. показатели  $N_3$  и  $N_4$  связаны между собой, что, в общем случае, указывает на нелинейность общей характеристики  $Q_{\text{лето}}^{\overline{OC}}$ . Однако для простоты изложения будем рассматривать некоторые частные случаи, предполагая, что в данной климатической зоне в летний период дождей не так много, чтобы они существенно изменяли, например, уровень грунтовых вод в течение всего выбранного временного интервала  $\Delta t$  (например, около трех месяцев или менее). Такова наша модель, оправдывающая линейный характер соотношения (1).

Приведенные рассуждения не привязаны к какой-либо географической точке. Хотя если рассматривать, например, хранилища РАО, расположенные на территории зоны отчуждения в области Украинского Полесья, где климат достаточно влажный, то интервал  $\Delta t$  необходимо дифференцировать на его составляющие:  $\Delta t_{\text{лето}} = \Delta t_{\text{лето } 1} + \Delta t_{\text{лето } 2} + \Delta t_{\text{лето } 3} + \dots$ .

По такой же схеме можно рассмотреть качество  $Q_{\Delta t}^{\overline{OC}}$  за любой промежуток времени  $\Delta t$ ; при этом, чем меньше  $\Delta t$ , тем с большей точностью и достоверностью, а в конечном итоге — на больший срок можно осуществить прогнозирование.

Для повышения точности прогнозирования влияния  $\overline{OC}$  на контейнеры (в зоне отчуждения), ввиду неустойчивости погоды в данном регионе, временной интервал  $\Delta t_{\text{зима}}$  должен быть существенно меньше  $\Delta t_{\text{лето}}$ .

В общем случае качество окружающей среды, действующей на контейнеры в зимний период, можно представить, например, в следующем виде:

$$Q_{\text{зима}}^{\overline{OC}} = \alpha_1 N_1 + \alpha_2 N_2 + \alpha_3 N_3 + \alpha_4 N_4 + \dots, \quad (2)$$

где  $N_1$  — относительный показатель среднесуточной температуры воздуха;  $N_2$  — относительный показатель колебаний дневной и ночной температуры;  $N_3$  — относительный показатель глубины промерзания грунта;  $N_4$  — число оттепелей;  $N_5$  — относительный показатель продолжительности снегопадов;  $N_6$  — относительный показатель толщины снежного покрова, и т. д. в зависимости от поставленной задачи и, в частности, от временного интервала  $\Delta t$ , характеризующего зимний период.

Таким образом, имея соответствующие данные о реальном или потенциальном влиянии  $\overline{OC}$  на условия эксплуатации контейнеров, что, в конечном итоге, может существенно и необратимо влиять и на изменения их различных эксплуатационных характеристик со временем, можно принимать какие-либо корректирующие и (или) предупреждающие действия. А главное — полученные данные могут быть использованы в целях создания более совершенных конструкций как контейнеров для захоронения РАО, так и хранилищ.

**Складирование контейнеров.** Рассмотрим некоторые вопросы, касающиеся процесса складирования контейнеров с РАО в хранилище: их перемещение (установка) и расположение. Процесс установки контейнеров в хранилище, а также их взаимное расположение при эксплуатации могут существенно влиять на основные эксплуатационные характеристики, например на долговечность.

Вопросы, связанные с перемещением контейнеров с помощью специального оборудования (специальные краны, тележки, погрузчики, траверсы и др.), на каждом конкретном хранилище решаются по-разному, но с учетом соблюдения всех норм общетехнической и радиационной безопасности. При этом наибольший интерес представляет организация процессов: перевозка контейнеров с РАО по территории хранилищ, выполнение погрузочно-разгрузочных работ (перемещение контейнеров с РАО из транспортных средств и установка их на место складирования) и др., поскольку именно при таких операциях увеличивается вероятность аварий и аварийных ситуаций.

Организацию перевозки РАО по территории хранилищ (соответствующая инфраструктура), а также организацию и обустройство мест (площадок) погрузочно-

разгрузочных работ следует рассматривать как некоторое частное приложение к проекту конкретного хранилища, что не входит в нашу задачу.

Остановимся, прежде всего, на некоторых вопросах расположения контейнеров в хранилище, которые существенно влияют на их долговечность, принимая во внимание, что этот показатель должен составлять 300—500 лет.

Как правило, в хранилищах РАО контейнеры складываются двумя способами:

1. На открытой площадке<sup>1</sup> (может быть предусмотрено навес), например, хранилище твердых радиоактивных отходов ТРО-1, размещенное на территории комплекса производств (КП) “Вектор”.

2. В специальном закрытом сооружении<sup>2</sup>:

- хранилище приповерхностного типа (обваловывается после полного заполнения контейнерами);
- хранилище наземного модульного типа и др.

Приведенная выше формальная схема дифференциации условий эксплуатации контейнеров как рабочая версия необходима для того, чтобы разработать систему соответствующих алгоритмов действий, препятствующих развитию негативных процессов при их эксплуатации.

Речь идет о выполнении контейнерами своих защитных функций, в первую очередь — о прочностных характеристиках в течение определенного заданного времени их эксплуатации (о таком параметре надежности контейнера, как долговечность).

Если контейнеры находятся на открытой площадке (железобетонное основание, подстилающие слои и т. д.), то, естественно, влияние на них ОС существенно больше, чем в случае, когда они находятся в закрытом хранилище. Например, они в значительной степени подвержены влиянию атмосферных осадков и, если в летний, весенний и осенний сезоны контейнеры на ветру быстро высыхают, то основные трудности возникают в зимний сезон — занос снегом, обледенение и т. д. Однако при таких условиях эксплуатации контейнеров можно, при помощи специальных средств и методами дистанционного визуального наблюдения, более эффективно контролировать как состояние самих контейнеров,

так и железобетонного основания площадки. Последнее представляется наиболее важным.

Если контейнеры находятся в закрытом хранилище, они в большей степени, чем на открытой площадке, защищены от влияния ОС, однако при этом сложнее контролировать процесс разрушения бетонной плиты основания хранилища (фундамента) и подстилающих слоев, даже с учетом наличия соответствующих скважин.

В общем случае со стороны ОС на деградацию железобетонной плиты основания влияют грунтовые воды, атмосферные осадки, различные аэрозоли в виде выбросов химических производств (если таковые находятся поблизости), климатические перепады температур и др.

Кроме того, перечисленные в [3] физико-химические процессы разрушения, протекающие в бетонных или железобетонных конструкциях и изделиях, также существенно зависят от температуры, влажности воздуха и других факторов ОС, т. е. от климатических и погодных условий, при которых эксплуатируются данные сооружения (хранилища) или изделия, в том числе контейнеры.

Помимо природных факторов, влияющих на долговечность контейнеров при их складировании, существуют и другие, в частности фактор размещения контейнеров, который проявляется во влиянии нагрузки (давления), действующей на контейнеры при складировании их по принципу штабельной упаковки.

Отдельно стоящий, а тем более стоящий в штабеле контейнер постоянно находится в поле внешних и внутренних напряжений. Считается, что для любого твердого материала всегда существует определенное пороговое значение напряжения, при достижении которого тело начинает разрушаться лавинообразно. Процессам разрушения содействуют внешние нагрузки, которые имеют продольную (вертикальную, направленную вниз от верхнего контейнера к нижнему)  $P_z$  и поперечные  $P_x, P_y$ , составляющие в горизонтальной плоскости  $xy$ .

Если контейнеры расположены в хранилище (штабельная упаковка) приповерхностного типа и пространство между контейнерами (штабелями контейнеров) плотно заполнено засыпкой, напряжения  $P_x$  и  $P_y$  в плоскости  $xy$  сбалансированы (уравновешены), а следовательно, ими можно пренебречь. В данном случае засыпка играет роль, во-первых, демпфера (амортизатора) и, во-вторых, жесткой ячеистой структуры. При этом внешняя нагрузка  $P_z$  ассоциируется с весом контейнера(ов), действующего(их) на расположенный(е) ниже другой(ие) контейнер(ы).

Если же штабеля контейнеров (состоящих, например, из 4 штук) находятся на открытой площадке и между ними имеется некоторое расстояние, то каждый контейнер испытывает напряжения

<sup>1</sup> Складирование контейнеров на открытой площадке рассчитано на определенное количество лет (в разных странах по-разному) с возможным последующим пролонгированием после принятия соответствующего решения. В Украине (Хмельницкая АЭС) базовый термин такого “временного” складирования составляет 30 лет; контейнеры ВВ-cube производства фирмы BalBok Engineering Co (София) стоят на открытой площадке Хмельницкой АЭС с 1995 года без заметных повреждений.

<sup>2</sup> В данных сооружениях сами контейнеры находятся под защитой других ЗБ, что при изначально правильном складировании может существенно продлить время их эксплуатации.

по трем направлениям хуз. При этом необходимо учитывать, что вес контейнера (брутто), например КТЗ-3.0<sup>1</sup> модификации с толщиной стенки 22 см, составляет в среднем 17400 кгс (коэффициент заполнения контейнеров — 0,8), и контейнеры устанавливают один на другой в четыре яруса. Таким образом, в среднем сила давления на нижний контейнер по всей его верхней площади (около 3,4 м<sup>2</sup>) составляет приблизительно 70 тс. Если в штабеле контейнеров по каким-либо причинам возникает отклонение от вертикали, вся нагрузка автоматически перераспределяется, давление на локальные участки верхней поверхности нижестоящего контейнера увеличивается, что в конечном итоге увеличивает риск его разрушения.

Отметим также, что контейнеры являются макрообъектами; несмотря на то что их ряды выставляют с помощью современных методов (лазерный уровень), они проседают, увеличивая тем самым напряжения в локальных областях каждого контейнера вертикального ряда. Жесткая сварная арматура, находящаяся внутри контейнера, делает его более устойчивым по отношению к различным нагрузкам [3]. Однако если контейнер имеет даже незначительное отклонение от вертикали, со временем арматура под нагрузкой начинает разрушать бетон в локально расположенной около нее области.

Для определения существующих пределов (допусков) при складировании контейнеров, например отклонения их от вертикали в случае штабельного складирования, необходимо проведение соответствующих стендовых экспериментов.

Возможно, между стоящими друг на друге контейнерами для сохранения вертикального положения верхнего контейнера нужно ставить демпфирующие прокладки из долговечного мягкого материала. В качестве одного из наиболее простых технических приемов можно предложить такой: перед установкой очередного верхнего контейнера на крышку нижнего контейнера одеть специальную форму из прочного пластика, в которую залить самовыравнивающийся слой бетона, а уже затем на образовавшуюся отвердевшую “идеально” горизонтальную поверхность поставить следующий контейнер. Однако такая операция приводит к увеличению нагрузки  $P_z$ . Кроме того, установку контейнеров в штабеле можно проводить с помощью специальных разборных направляющих.

Существует еще один важный аспект складирования контейнеров на открытой площадке.

Железобетонную плоскую плиту-основание<sup>2</sup>, на которой размещаются контейнеры, можно

представить как тонкую (толщина пластины значительно меньше размеров основания) жесткую (пластины малого прогиба, не более 1/4 толщины) плоскую анизотропную (материал пластины не обладает одинаковыми упругими свойствами во всех направлениях) пластину. Такая пластина имеет определенные собственные частоты колебаний, которые зависят от размеров и материала пластины, характера ее анизотропии, характера и количества точек нагрузки и др. Ее поведение (частотные и амплитудные характеристики свободных и вынужденных колебаний; силовые факторы, выраженные через прогибы с учетом пластических деформаций, и др.) описывается уравнениями математической физики. Для получения точных решений соответствующих уравнений требуется необходимое и достаточное количество конкретных точных данных, которых, как правило, нет и получить их экспериментальным путем практически невозможно. В силу своей принципиальной неоднозначности данные уравнения решаются в рамках определенных граничных условий и часто носят лишь оценочный характер.

Колебательные процессы, в том числе и вынужденные колебания, в плите-основании могут быть вызваны самыми различными явлениями: подвижками грунтов (что актуально для зоны отчуждения), нагрузками на плиту при ее заполнении контейнерами и пр., которые существенно увеличивают вероятность разрушения плиты-основания и генерации негативных последствий для такой системы хранения РАО.

Отметим также, что железобетонная плита-основание создается заливкой металлической арматуры бетоном с наполнителем. Процесс заливки происходит не одномоментно, а в течение некоторого времени (исчисляемого в днях). При этом в различных участках плиты как по толщине, так и по площади, бетон застывает и превращается в бетонный камень в разное время, образуя соответствующие границы разделов между областями с различной плотностью бетона. Не вдаваясь в анализ и описание физико-химических процессов разрушения изделий из бетона, можно утверждать, что эти границы являются потенциальными источниками разрушения данной плиты [3]. Чем больше толщина и площадь такой плиты, тем процессы разрушения более вероятны и скорость их выше.

Рассмотрим в качестве примера еще один немаловажный фактор.

Железобетонную плиту-основание с установленными на ней штабелями контейнеров<sup>3</sup> можно считать одной целостной системой, состоящей из двух

<sup>1</sup> Размер контейнера 194×194×185 см.

<sup>2</sup> На хранилище КП “Вектор” (хранилище ТРО-1) ее размер составляет 200×29,3 м.

<sup>3</sup> Высота штабеля контейнеров составляет приблизительно 7,5 м.

подсистем, связанных между собой: описанной выше пластины и расположенного на ней множества осцилляторов — штабелей контейнеров, частоты и фаза колебаний которых, в общем случае, различны. Одно из свойств такой системы (пластина+осцилляторы) состоит в том, что колебания самой пластины-основания синхронизируют колебания отдельных осцилляторов (штабеля контейнеров), что может привести к весьма опасным резонансным явлениям. Кроме того, долговечность этих двух подсистем может существенно различаться; при этом возникает вопрос, сколько лет можно эксплуатировать их в данных условиях с сохранением проектных параметров на уровне, например, 90 %.

Предположим, что контейнеры быстрее, чем плита-основание, теряют уровень своих эксплуатационных характеристик. Тогда может появиться необходимость в переупаковке содержимого этих контейнеров в другие контейнеры. Таким образом, кроме чисто технической проблемы возникает новая проблема — экономическая, с учетом того, что на плите-основании располагается от 4000 до 4500 контейнеров.

И это далеко не полный перечень негативного влияния условий эксплуатации контейнеров при размещении их на открытой площадке.

В заключение следует обратить внимание еще на один методологический аспект. Влияние  $\overline{OS}$  на систему (плита-основание+контейнеры) можно рассматривать как процесс взаимодействия  $\overline{OS}$  с данной системой. Изучая параметры взаимодействия, в свою очередь, можно определить наиболее важный для эксплуатации интегральной системы параметр — энтропию системы, т. е. функцию, которая указывает на то, в какой мере система далека от состояния равновесия или близка к нему. При этом следует рассмотреть все условия, способствующие устойчивому равновесию между изменениями в системе и ее окружении. Разумеется, устойчивое равновесие данной интегральной системы можно поддерживать лишь в течение

относительно небольшого промежутка времени, например годы, а что касается десятилетий — вопрос. Все расчеты в этой области должны быть отражены в проектных решениях систем, а также в документации по анализу их безопасности.

### Выводы

Открытое складирование контейнеров на больших по площади основаниях несет в себе угрозу разрушения как самих оснований, так и контейнеров, расположенных на них. Поэтому нужно искать принципиально новые решения при создании хранилищ временного хранения РАО в контейнерах.

На первый взгляд, вместо целостной плиты-основания необходимо создавать плиты-основания существенно меньшего размера по площади и, главное, не связанные между собой общим фундаментом. Однако этот вопрос требует изучения.

Предполагается, что после заполнения открытого хранилища ТРО-1 оно будет обваловано в соответствии с существующим проектом. При этом существует два концептуальных подхода:

- хранилище обваловывают после полного заполнения его контейнерами;
- хранилище обваловывают по мере его заполнения контейнерами

Очевидно, в любом случае чрезвычайно важна технология процесса обваловывания, чтобы не разрушить установленные штабеля контейнеров. В этой связи предложенный вариант конструкции хранилища, который предусматривает меньшие по площади и не связанные между собой плиты-основания, был бы более рациональным не только с точки зрения прочностных характеристик самой плиты-основания, но и с точки зрения заполнения ее контейнерами с последующим обваловыванием.

В заключение подчеркнем, что рассмотренные элементы некоторой формализации при решении поставленной задачи актуальны для любых хранилищ и любых контейнеров рассматриваемого типа.

### Список использованной литературы

1. Васильченко В. Н. Защитные барьеры в ядерной энергетике: основные причины деградации / В. Н. Васильченко, Я. А. Жигалов, Г. А. Сандул // Ядерна енергетика та довілля. — 2013. — № 1. — С. 38—45.
2. Защитные барьеры в ядерной энергетике: некоторые сценарии деградации системы “контейнер+ радиоактивные отходы” / В. Н. Васильченко, Я. А. Жигалов, А. В. Носовский, Г. А. Сандул // Ядерна та радіаційна безпека. — 2013. — № 4 (60). — С. 26—32.
3. Некоторые сценарии деградации бетонных конструкций, используемых в качестве защитных барьеров в ядерной энергетике / В. Н. Васильченко, Я. А. Жигалов, А. В. Носовский, Г. А. Сандул // Ядерна енергетика та довілля. — 2013. — № 2. — С. 22—30.
4. Норми радіаційної безпеки України. Доповнення: радіаційний захист від джерел потенційного опромінення : НРБУ-97 / Д-2000. — К., 2000. — 80 с.

Получено 31.03.2014