

МЕТОДЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПОЖАРОВЗРЫВОБЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ОБРАЩЕНИИ С ПОВРЕЖДЕННЫМ ОТРАБОТАВШИМ ЯДЕРНЫМ ТОПЛИВОМ

Гаязов А.З., Комаров С.В., Лещенко А.Ю., Ревенко К.Е., Смирнов В.П.
(ООО НПФ «Сосны», Дмитровград, Россия)

Введение

Вопросы пожаро- и взрывобезопасности на всех этапах обращения с некондиционным отработавшим ядерным топливом (ОЯТ) являются одним из ключевых аспектов обеспечения безопасности на объектах ЯТЦ, поскольку аварийные процессы, вызванные горением или взрывом продуктов радиолитического разложения воды могут привести к нарушению целостности физических барьеров на пути распространения ионизирующего излучения и радиоактивных веществ в окружающую среду.

Несмотря на высокую значимость проблематики водородной безопасности при обращении с поврежденным ОЯТ, в нормативной документации, регламентирующей обеспечение безопасности объектов использования атомной энергии, отсутствуют конкретные принципы и критерии обеспечения пожаро- взрывобезопасности. Так например:

– согласно [1] в проекте должны быть предусмотрены технические средства и организационные мероприятия по обеспечению взрыво- и пожаробезопасности объекта ЯТЦ;

– в соответствии с [2] в проекте атомной станции должна быть обоснована водородная взрывозащита, а также предусмотрены средства контроля физико-химических параметров водородсодержащих смесей в атмосфере герметичного ограждения».

– в правилах [3] требования по обеспечения взрыво- и пожаробезопасности при транспортировании отсутствуют.

Данное обстоятельство приводит к значительным трудностям в выборе способа обеспечения водородной безопасности в процессе разработки технологий обращения с поврежденным ОЯТ.

Целью доклада является обзор и обобщение основных методов, а также формулировка критериев выбора способов обеспечения пожаро- взрывобезопасности при обращении с некондиционным ОЯТ.

1 Описание основных физико-химических процессов, протекающих при радиолитическом разложении воды

Согласно литературным источникам [4], [5] первичными продуктами радиолиза являются: гидратированный электрон (e_{aq}^-), атом Н, гидроксильный радикал ОН, молекулярный водород H_2 , перекись водорода H_2O_2 , ионы H_3O^+ и OH^- . Н, ОН и e_{aq}^- называют радикальными продуктами радиолиза воды, H_2 и H_2O_2 – молекулярными. Процессы образования данных продуктов происходят в микрообластях высокой плотности ионизации, называемых шпорами.

Важнейшим параметром, характеризующим радиационно-химический процесс, является радиационно-химический выход – количество молекул какого-либо вещества, образовавшихся (или разложившихся) при поглощении системой энергии ионизирующего излучения, равной 100 эВ.

Количества e_{aq}^- , радикалов H_3O^+ , OH , избежавших «гибели» в шпорах, и H , H_2 , H_2O_2 , OH , образовавшихся в шпорах, называют начальными выходами первичных продуктов радиолиза воды (G_{X_2} , G_X).

После завершения реакций в шпорах H_2 и H_2O_2 могут претерпевать дальнейшие превращения в объеме воды. Вследствие этого их выходы, наблюдаемые в ходе экспериментов, могут отличаться от начальных выходов. Такие выходы называются наблюдаемыми.

Для расчетов скорости образования водорода зачастую используют формулу:

$$\frac{dH_2}{dt} = \frac{G_{H_2} \cdot I \cdot V_m}{100 \cdot N_A},$$

где $\frac{dH_2}{dt}$ – скорость образования молекулярного водорода, л/с;

G_{H_2} – радиолитический выход водорода, молекул/100эВ;

I – мощность дозы излучения (энергия, поглощаемая водой при радиолизе), эВ/с;

V_m – молярный объем, 22,4 л/моль;

N_A – число Авогадро, $6,022 \cdot 10^{23}$ моль⁻¹.

Представленная выше формула не учитывает соотношения газовой и жидкой фазы. На рис.1 показаны результаты экспериментов по определению зависимости абсолютного количества выделившегося в свободный объем водорода от поглощенной дозы при различных содержаниях воды [6].

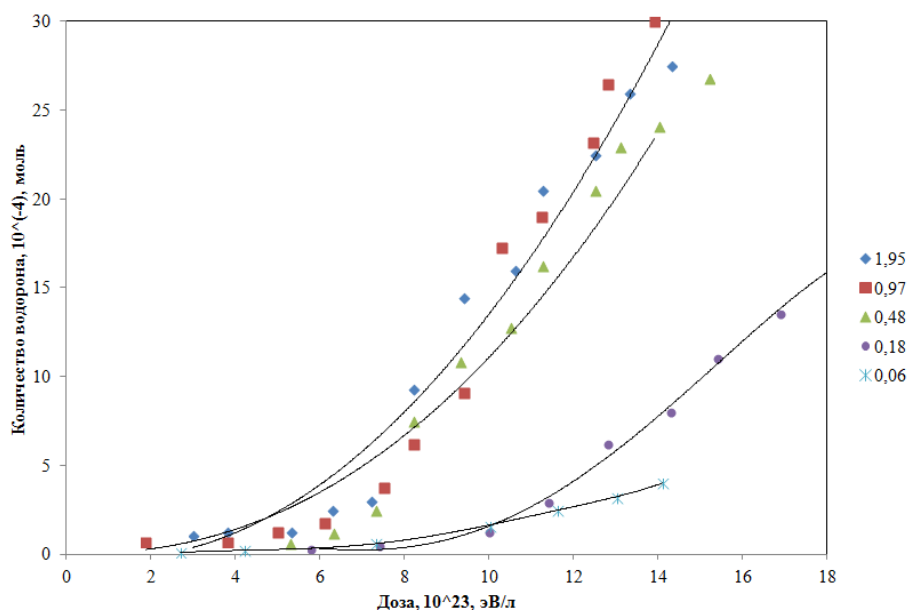


Рис. 1. Зависимость абсолютного количества выделившегося в свободный объем водорода от дозы при различных соотношениях объемов газовой и жидкой фаз $V_{г}/V_{ж}$

Из рис.1 видно, что выход водорода, выделяющегося в свободный объем, уменьшается с уменьшением $V_{г}/V_{ж}$. Однако если рассматривать смесь в свободном объеме с точки зрения ее взрывоопасности, то здесь определяющую роль играет не абсолютное, а относительное количество водорода по сравнению с остальными компонентами смеси. Вероятность образования взрывоопасной смеси в сосудах с малым $V_{г}/V_{ж}$ выше, чем в сосудах с большим $V_{г}/V_{ж}$.

В данной формуле не учитывается тот факт, что при воздействии ионизирующего излучения на воду молекулярные продукты радиолиза будут накапливаться до тех пор, пока их концентрация не достигнет так называемого стационарного состояния, когда скорость обратных вторичных реакций, в которых молекулярные продукты разлагаются, равна скорости их образования в первичных процессах в шпорах.

Также при расчете скорости образования водорода в результате радиолиза воды по представленной выше формуле учитывается лишь образование водорода в результате радиолиза воды при воздействии гамма-излучения.

При повреждении оболочек твэлов как правило, имеет место контакт топлива с водой. В этом случае радиолиз обусловлен также действием других частиц с более высокой линейной передачей энергии (например, альфа-частицы). Величина линейной передачи энергии существенно влияет на стационарные концентрации продуктов радиолиза. Увеличение линейной передачи энергии приводит к повышению стационарных концентраций водорода и перекиси водорода. Так, например, при облучении воды ускоренными тяжелыми ионами стационарное состояние может вообще не достигаться. Это связано с увеличением начального выхода образования водорода и перекиси водорода, обусловленным возрастанием вероятности образования рекомбинационных процессов в треках, а также с уменьшением скорости разложения молекулярных продуктов в объеме раствора из-за снижения начальных выходов радикальных продуктов радиолиза воды.

Несмотря на то, что радиационной химией воды занимаются многие десятилетия, к настоящему моменту существует дефицит открытой информации о закономерностях процессов разложения воды в процессе хранения разрушенного ОЯТ. Имеющиеся данные позволяют на качественном уровне понимать происходящие радиационно-химические превращения воды; количественные прогнозы возможны только в довольно ограниченном диапазоне условий. Существующие оценки имеют в лучшем случае полуэмпирический характер. Такой подход не позволяет оценивать нестандартные и/или аварийные ситуации, когда нарушаются условия существования стационарного равновесия между прямыми и обратными процессами. Наличие в воде растворенных радионуклидов, продуктов коррозии конструкционных материалов, а также химических соединений, предназначенных для поддержания водно-химического режима, затрудняет определение кинетики выхода радиолитических газов.

Таким образом, гарантированным способом обеспечения пожаро- и взрывобезопасности при обращении с поврежденным ОЯТ является полное исключение одного из факторов, инициирующих процесс радиолитического разложения воды и накопления продуктов радиолиза в замкнутом объеме. К указанным методам могут относиться полное удаление свободной и связанной воды из герметичного объема или создание условий для удаления газообразных продуктов радиолиза из системы со скоростью, превышающей их генерацию. Кроме того, пожаро- и взрывобезопасность системы, содержащей ОЯТ с признаками повреждения оболочек твэлов, может быть достигнута введением ограничений на величину свободного газового объема в герметичном оборудовании, а также регламентированием длительности нахождения данного оборудования в герметичном состоянии.

Также важно отметить, что в связи с наличием широкого спектра факторов, влияющих на процесс образования газообразных продуктов радиолиза, любой из выбранных методов должен иметь экспериментальное и/или расчетное обоснование, выполненное в консервативной постановке.

В последующих разделах приведены примеры успешной реализации методов обеспечения пожаро- и взрывобезопасности оборудования и упаковок для обращения с

поврежденным ОЯТ, а также рассмотрены аспекты выбора каждого из рассмотренных методов.

2 Методы обеспечения пожаро- взрывобезопасности

2.1 Удаление воды из герметичного объема с поврежденным ОЯТ

Данный метод является одним из способов кардинального решения вопроса обеспечения пожаро- и взрывобезопасности при обращении с поврежденным ОЯТ, поскольку направлен на исключение одного из условий протекания процесса радиолитического разложения воды.

В качестве критерия удаления воды из герметичного объема, как правило, используется остаточное количество влаги, которое при полном разложении обеспечивает неперевышение нижнего концентрационного предела самовоспламенения, установленного для водородно-кислородных систем (4% об. H_2 или 5% об. O_2) [7].

Гарантированное удаление химически не связанной воды из элементов оборудования/упаковок, содержащих поврежденное ОЯТ, достигается вакуумированием герметичного внутреннего объема до давления, которое ниже давления насыщенного водяного пара при температуре, соответствующей температуре воздушной среды в оборудовании/упаковке. Отсутствие химически не связанной воды в объеме оборудования/упаковок позволяет минимизировать процессы образования водорода и кислорода, вызванные радиолизом и коррозией конструкционных материалов и топливной композиции. Для предотвращения радиолиза, вызванного разложением атмосферной влаги в результате натечек воздуха, внутренний объем оборудования/упаковок должен быть заполнен инертным газом.

Немаловажным фактором обеспечения пожаро- и взрывобезопасности при реализации данного метода в случае обращения с поврежденным ОЯТ, с топливной композицией на основе химически активных компонентов, является проблема химически связанной воды, которая содержится в продуктах коррозии. Вклад данного фактора должен быть учтен при определении концентраций продуктов радиолиза в оборудовании/упаковках, и, при необходимости, должны быть приняты меры для удаления химически связанной воды (как правило, термическое разложение химических соединений при нагреве до 200-400 °С).

Также внешний нагрев применяется для ускорения процесса удаления влаги вакуумируемого объема упаковок (метод термовакуумной осушки).

К достоинствам данного метода обеспечения пожаро- и взрывобезопасности следует отнести возможность создания условий для нерегламентированной длительности нахождения в герметичном объеме ОЯТ с любой степенью повреждения, а также универсальность применения этого метода для хранения и для транспортирования упаковок с поврежденным ОЯТ.

Недостатками рассматриваемого метода являются:

- финансовые затраты на создание дополнительного оборудования для осушки оборудования/упаковок с поврежденным ОЯТ;
- необходимость проведения научно-исследовательских работ по определению температурных режимов осушки ОЯТ и скорости накопления продуктов радиолиза в оборудовании/упаковке после осушки;
- значительные временные затраты на осушку оборудования/упаковок с поврежденным ОЯТ перед герметизацией.

Практически этот метод обеспечения пожаро- и взрывобезопасности был реализован на АЭС «Пакш» (Венгрия) при подготовке пеналов с разрушенным ОЯТ

ВВЭР-440 к транспортированию на ФГУП «ПО «Маяк». Для удаления воды из внутреннего объема пеналов с фрагментированным ОЯТ использовался комплекс оборудования [8], предназначенный для термовакуумной осушки, заполнения газом и герметизации пеналов с ОЯТ. Разработке данного оборудования предшествовала научно-исследовательская работа по определению скорости накопления продуктов радиолиза при размещении влажного фрагментированного ОЯТ в герметичном объеме, выполненная в ОА «ГНЦ НИИАР». По результатам проведенных исследований было установлено, что кинетика накопления водорода при выдержке влажного ОЯТ имеет перелом по скорости накопления водорода, при этом не исключалось превышение допустимой концентрации исследуемого газа в объеме (рис.2). С другой стороны, исследования кинетики накопления водорода в пеналах с осушенным ОЯТ (рис.3) показали, что через десять лет в пенале, загерметизированном после термовакуумной осушки, содержание водорода не превысит 0,06 %.

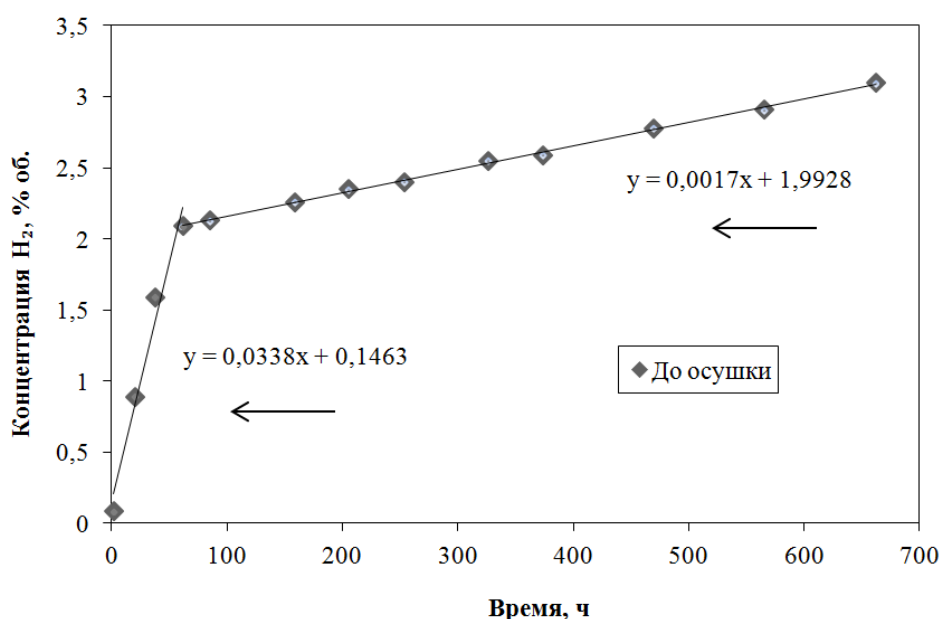


Рис. 2. Кинетика накопления водорода в пеналах с влажными ОЯТ

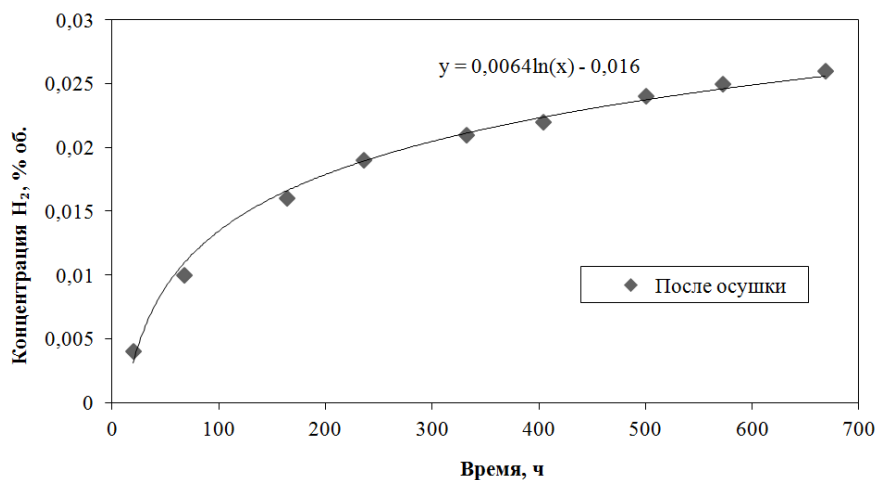


Рис. 3. Кинетика накопления водорода в пеналах с ОЯТ после термовакуумной осушки

В результате проведения практических работ с использованием выбранных температурных режимов была выполнена осушка 68-ми пеналов с фрагментированным ОЯТ ВВЭР-440. Осушенные пеналы были успешно доставлены на ФГУП «ПО «Маяк».

Другим примером обеспечения пожаро- и взрывобезопасности за счет реализации метода термовакуумной сушки является технология подготовки ОЯТ реакторов АМБ к радиохимической переработке [9]. Данная технология является уникальной, в том числе, с точки зрения номенклатуры топливных композиций и характера повреждения ОЯТ. По результатам научно-исследовательской работы [10], выполненной на этапе разработки и обоснования безопасности технологии обращения с ОТВС АМБ, было установлено, что при контакте с водой топлива на основе карбида урана в кальциевой матрице протекают физико-химические процессы, сопровождающиеся интенсивным выделением метана и водорода. Тем не менее, полученные экспериментальные данные по выходу молекулярных продуктов радиолиза после удаления воды (химически связанной и свободной) из первичных упаковок с ОЯТ методом термовакуумной сушки показали возможность обеспечения пожаро- и взрывобезопасности при их бессрочном хранении в герметичном состоянии.

2.2 Размещение поврежденного ОЯТ в негерметичном оборудовании/упаковках

Другим возможным методом обеспечения пожаро- взрывобезопасности при обращении с поврежденным ОЯТ является использование негерметичных упаковок для целей перевозки и обращения. Реализация данного метода позволяет обеспечить пожаро- и взрывобезопасность за счет конструктивных особенностей оборудования/упаковок, позволяющих достичь превышения скорости утечки над скоростью генерации молекулярных продуктов радиолиза в объемах с поврежденным ОЯТ.

Данный метод является наиболее распространенным на объектах использования атомной энергии при хранении поврежденного ОЯТ в бассейнах выдержки. Применение рассматриваемого способа обеспечения пожаро- и взрывобезопасности требует наличия определенных особенностей в конструкции оборудования и упаковок:

- возможность подключения оборудования к системе вытяжной вентиляции;
- применение в составе первичных упаковок с поврежденным ОЯТ специальных запорных устройств, обеспечивающих беспрепятственный выход продуктов радиолиза и при этом исключающих контакт поврежденного топлива с окружающей средой.

Также необходимо отметить, что применение данного метода обеспечения пожаро- и взрывобезопасности поврежденного ОЯТ невозможно для первичных упаковок при транспортировании в связи с жесткими требованиями к герметизации ТУК. Как правило, при транспортировании первичных упаковок с поврежденным ОЯТ, находившихся на хранении в негерметичном состоянии, предварительно выполняются работы по их осушке и герметизации в объеме ТУК.

К достоинствам данного метода обеспечения пожаро- и взрывобезопасности относятся:

- отсутствие необходимости в проведении широкомасштабных научно-исследовательских работ по определению выхода продуктов радиолитического разложения воды. Как правило, для обоснования безопасности конструкции оборудования/упаковки достаточно консервативных оценок;

- отсутствие длительных технологических операций по подготовке оборудования/упаковок к размещению поврежденного ОЯТ;
- отсутствие ограничений, накладываемых на длительность пребывания поврежденного ОЯТ в негерметичном объеме оборудования/упаковок.

Недостатками обеспечения пожаро- и взрывобезопасности путем размещения поврежденного ОЯТ в объеме негерметичного оборудования/упаковок являются:

- необходимость включения в состав оборудования/упаковок дополнительных устройств, обеспечивающих удаление газообразных продуктов радиолиза и исключающих контакт поврежденного ОЯТ с окружающей средой;
- необходимость разработки дополнительного оборудования для подготовки упаковок к транспортированию;
- необходимость проведения дополнительных технологических операций при подготовке упаковок с поврежденным ОЯТ к транспортированию.

В качестве примера реализации рассматриваемого метода обеспечения пожаро- и взрывобезопасности можно привести временное хранение пеналов с поврежденным ОЯТ ВВЭР-440 в бассейне выдержки АЭС «Пакш» [8]. Для безопасного хранения фрагментированного оксидного ОЯТ в водонаполненных пеналах в конструкции первичных упаковок предусматривался сильфонный узел, обеспечивающий выход газообразных продуктов радиолиза и исключающий выход радиоактивной воды пенала в бассейн выдержки. Реализация данной технологии позволила осуществить безопасное хранение первичных упаковок с ОЯТ в бассейне выдержки АЭС «Пакш». На последующем этапе подготовки к транспортированию выполнялась замена крышек пеналов и удаление воды методом термовакуумной осушки. После удаления влаги пеналы заполнялись инертным газом и герметизировались.

Другим примером размещения поврежденного ОЯТ в негерметичных упаковках является технология хранения некондиционных ОТВС тяжеловодного реактора RA в бассейновом хранилище ОЯТ Института ядерных наук «Винча», Сербия [11]. Отличительной особенностью данной технологии являлось наличие непосредственного контакта пенализованного топлива с водой хранилища. При этом радиоактивные вещества, поступающие в хранилища вследствие контакта поврежденного ОЯТ с водой, были локализованы на фильтрах системы водоочистки объекта. Последующее транспортирование поврежденного ОЯТ на переработку осуществлялось в негерметичных пеналах в ТУК-19 и ТУК SKODA VPVR/M после осушки внутреннего объема упаковок методом вакуумирования и заполнения внутреннего объема ТУК смесью инертных газов [12].

2.3 Размещение в упаковках без свободного объема

Размещение поврежденного ОЯТ в оборудовании/упаковках без свободного газового объема позволяет обеспечить пожаро- и взрывобезопасность технологии за счет нахождения всех продуктов радиолиза, в том числе радиолитических газов, в растворенном состоянии. При этом создаются условия для эффективного протекания обратных реакций.

К достоинствам данного метода можно отнести:

- отсутствие значительных временных затрат, поскольку в объем подготовительных операций входит только герметизация водонаполненной полости;
- неограниченные сроки размещения поврежденного ОЯТ в герметичном оборудовании/упаковке без свободного газового объема за счет

отсутствия условий для нарушения равновесного состояния между реакциями образования и рекомбинации газообразных продуктов радиолиза;

- возможность хранения и транспортировки первичных упаковок с поврежденным ОЯТ в герметичных пеналах, не имеющих свободного газового объема.

Реализация указанного метода требует наличия определенных особенностей в конструкции оборудования/упаковок, исключающих образования застойных зон (воздушных карманов) в полостях, где размещается поврежденное ОЯТ. Кроме того, применение рассматриваемого способа обеспечения пожаро- и взрывобезопасности для первичных упаковок, находившихся в режиме сухого хранения в негерметичном состоянии, требует создания дополнительных технологий и оборудования.

Учитывая, что при контакте облученного топлива с водой процесс радиолиза протекает под действием частиц с более высокой передачей энергии (по отношению к гамма-излучению) и характеризуется повышенным начальным выходом молекулярных газообразных продуктов, ожидаемые параметры стационарного равновесия рассматриваемой замкнутой системы должны быть подтверждены и обоснованы.

Данный метод был успешно реализован для обеспечения пожаро- и взрывобезопасности при транспортировании некондиционных ОТВС ВВЭР-440 с территории АЭС «Козлодуй» на ФГУП «ПО «Маяк». Для выполнения перевозки были разработаны пеналы, позволяющие герметизировать водонаполненный внутренний объем первичной упаковки с поврежденной ОТВС. Конструкция пеналов исключала наличие воздуха во внутреннем объеме. Перевозка выполнялась также в водонаполненном контейнере ТУК-6, при этом в связи с отсутствием возможности контроля наличия свободного газового объема для упаковочного комплекта было определено допустимое время нахождения в герметичном состоянии – 1 год.

2.4 Ограничение времени нахождения поврежденного ОЯТ в герметичном объеме

Данный способ обеспечения безопасности базируется на определении допустимого времени генерации газообразных продуктов радиолиза, в течении которого при условиях хранения рассматриваемого некондиционного ОЯТ в объеме оборудования/упаковки будет достигнута максимально-допустимая концентрация пожаро- взрывоопасных газов.

Реализация метода обеспечения водородной безопасности за счет ограничения времени нахождения поврежденного ОЯТ в герметичном объеме не требует применения дополнительных технических средств.

Кроме того, к достоинствам рассматриваемого способа можно отнести отсутствие временных затрат на подготовительные операции перед размещением ОЯТ в оборудовании/упаковке, а также возможность применения данного метода как при хранении, так и при транспортировании некондиционного ОЯТ.

Несмотря на указанные преимущества, применение данного метода связано с введением лишь организационных мер, при отступлении от которых не исключено накопление газообразных продуктов радиолиза в количестве, превышающем безопасные значения. Учитывая данное обстоятельство, главенствующая роль при определении допустимого времени нахождения ОЯТ в герметичном объеме отводится работам по определению скоростей генерации газообразных продуктов в результате взаимодействия поврежденного ОЯТ с водой. Как правило, при обосновании длительности нахождения ОЯТ в герметичном объеме используют двукратный запас до достижения нижнего концентрационного предела самовоспламенения.

Как было отмечено выше, определение скоростей протекания физико-химических процессов в условиях контакта ОЯТ с водой методами математического моделирования является не тривиальной задачей, которая может быть решена только в консервативной постановке. Данное обстоятельство может привести к существенному снижению сроков нахождения поврежденного ОЯТ в герметичном объеме и полностью исключить применение рассматриваемого метода обеспечения пожаро- и взрывобезопасности. Снижение степени консерватизма возможно только за счет проведения научно-исследовательских работ, максимально близко имитирующих предполагаемые условия размещения ОЯТ в герметичном объеме.

Данный метод широко распространен при кратковременных перевозках поврежденного ОЯТ, не требующих длительной герметизации упаковки. В частности, при вывозе некондиционного ОЯТ РБМК-1000 с Ленинградской АЭС на ФГУП «ПО «Маяк» в составе ТУК-11 использовались герметичные ампулы [13]. Размещение пучков твэлов и герметизация внутреннего объема данных ампул осуществлялось без предварительной осушки. Реализации данного проекта предшествовала значительная научно-исследовательская работа, включавшая в себя математическое моделирование физико-химических процессов, протекающих в объеме не осушенной ампулы, а также эксперименты по определению скорости накопления водорода [14]. Проведенное экспериментальное обоснование позволило снизить консерватизм использованной расчетной модели за счет протекания обратных химических реакций, что существенно увеличило допустимую длительность нахождения ампулы в герметичном состоянии.

Заключение

Результаты работ, представленные в настоящем докладе, говорят о том, что при выборе метода обеспечения пожаро- и взрывобезопасности в каждом конкретном случае необходимо проведение комплексного анализа широкого спектра технико-экономических факторов. При этом, учитывая значительные финансовые и временные затраты на разработку оборудования и проведение научно-исследовательских работ, указанный выбор должен быть сделан и обоснован на начальной стадии разработки технологии (на стадии технико-экономических исследований).

Таблица 1, в которой обобщены рассмотренные в докладе методы обеспечения пожаро- и взрывобезопасности оборудования/упаковок с поврежденным ОЯТ, может помочь с выбором оптимальной технологии на начальных этапах разработки.

Таблица 1

Матрица выбора метода обеспечения пожаро- взрывобезопасности

Методы:	Параметры			
	Разработка дополнительного оборудования	Проведение НИР в обоснование сроков хранения	Выполнение длительных подготовительных технологических операций перед размещением поврежденного ОЯТ	Введение ограничений на длительность размещения ОЯТ в оборудовании
Удаление воды из герметичного объема с поврежденным ОЯТ (п.2.1)	Требуется	Требуется	Требуется	Не требуется
Размещение поврежденного ОЯТ в негерметичном оборудовании/упаковках (п.2.2)	Требуется	Не требуется	Не требуется	Не требуется

Методы:	Параметры			
	Разработка дополнительного оборудования	Проведение НИР в обоснование сроков хранения	Выполнение длительных подготовительных технологических операций перед размещением поврежденного ОЯТ	Введение ограничений на длительность размещения ОЯТ в оборудовании
Размещение поврежденного ОЯТ в оборудовании/упаковках без свободного объема (п.2.3)	Требуется	Требуется	Не требуется	Не требуется
Ограничение времени нахождения поврежденного ОЯТ в герметичном объеме (п.2.4)	Не требуется	Требуется	Не требуется	Требуется

Окончательный выбор способа обеспечения водородной безопасности должен быть обоснован с помощью расчетных и/или экспериментальных методов. При этом выбор способа обоснования является также не простой многофакторной задачей, поскольку применение расчетно-аналитических методов оценки скоростей образования радиолитических газов связано с разработкой математических моделей, описывающих сложные физико-химические процессы в консервативной постановке, а экспериментальное обоснование пожаро- взрывобезопасности, дающее менее консервативные результаты, приводит к значительным финансовым затратам.

В заключении необходимо отметить, что актуальность рассмотренного аспекта обеспечения безопасности будет расти по мере накопления поврежденного ОЯТ на объектах использования атомной энергии. При этом упрощение процедуры выбора и обоснования способов борьбы с накоплением продуктов радиолиза возможно только за счет увеличения и систематизации объемов экспериментальных данных, развития программных средств, а также совершенствования нормативной базы в области обеспечения пожаро- и взрывобезопасности.

Список литературы

1. Общие положения обеспечения безопасности объектов ядерного топливного цикла (ОПБ ОЯТЦ). НП-016-05: утв. постановлением Федеральной службы по экологическому и атомному надзору 02.12.2005: введ. 01.05.2006.
2. Общие положения обеспечения безопасности атомных станций. НП-001-15: утв. постановлением Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору 17.12.2015: введ. 15.02.2016. – М., 2015. – 30 с.
3. Правила безопасности при транспортировании радиоактивных материалов. НП-053-16: Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору. Москва, 2016.
4. Ален А.О. – Радиационная химия воды и водных растворов. Пер. с англ. Под ред. П.И. Долина. М.: Атомиздат, 1963..
5. Кабакчи С.А., Пикаев А.К. Методы расчета газовой выделенности и оценки взрывоопасности радиационно-химических аппаратов с водяным теплоносителем или биологической защитой. М.: Энергоиздат, 1981, 51 с. – (Радиационно-химическая технология; Вып.7).
6. Кабакчи С.А., Шубин В.Н., Долин П.И. – Химия высоких энергий, 1967, т.1, с.148.

7. *С.А. Кабакчи, Г.П. Булгакова.* Радиационная химия в ядерном топливном цикле. – М.: РХТУ им. Д.И. Менделеева, 1997. – 97 с.
8. Вывоз дефектного топлива в пеналах с АЭС «Пакш» на переработку в Россию / Лариса Сёке нач. Отдела Ядерного Топлива АЭС «Пакш» // АТОМЭКСПО 2015, Москва, 3 июня 2015 г.
9. *В.П. Смирнов,* Создание технологий обращения с ОЯТ АМБ // Безопасность ядерных технологий и окружающей среды 2010, Вып. №1. С. 87–89.
10. Обращение с ОЯТ энергетических реакторов с графитовым замедлителем / *В.П. Смирнов* // Международная школа-семинар по ядерным технологиям "Черемшанские чтения", Димитровград, 24-27 апреля 2012 г.
11. Подготовка к перевозке поврежденного ОЯТ сербского исследовательского реактора РА / *Комаров С.В., Иващенко А.А., Самсонов А.А., Амосов С.В.* // VII Международный ядерный форум «Безопасность ядерных технологий: транспортирование радиоактивных материалов – «АТОМТРАНС-2012», С.-Петербург, 17-21 сентября 2012 г.
12. *А.А.Самсонов, С.В.Амосов, А.А.Иващенко,* Обращение с дефектным ОЯТ института «Винча» // Безопасность ядерных технологий и окружающей среды 2011, Вып. №1. (спецвыпуск) С. 84–88.
13. *Б.А. Канашов, А.Н. Дорофеев, В.П. Смирнов, А.В. Хаперская, Е.Г. Кудрявцев, Н.Н. Калязин, И.Н. Ложников,* Транспортирование некондиционного ОЯТ РБМК с Ленинградской АЭС на ФГУП «ПО «Маяк» // Безопасность ядерных технологий и окружающей среды 2012, Вып. №2. С. 35–38.
14. Экспериментальные и расчетные исследования для обоснования пожаро- и взрывобезопасности при обращении с негерметичным ОЯТ реакторов РБМК-1000 / *Амосов С.В., Деткина А.В., Лещенко А.Ю., Семеновых С.В., Ильин П.А., Теплов В.Г.* // VII Международный ядерный форум «Безопасность ядерных технологий: транспортирование радиоактивных материалов – «АТОМТРАНС-2012», С.-Петербург, 17-21 сентября 2012 г.