

УДК 541.11

О СПЕЦИФИКЕ ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ ВЗРЫВООПАСНОСТИ ОБЪЕКТОВ ЯДЕРНОГО ТОПЛИВНОГО ЦИКЛА

Соколов И.П., д.х.н., Назин Е.Р., к.т.н.,
Шарафутдинов Р.Б., к.т.н. (ФБУ «НТЦ ЯРБ»),
Кудрявцев Е.Г., к.т.н. (Ростехнадзор), Белова Е.В., к.х.н.,
Мясоедов Б.Ф., академик РАН (ИФХЭ РАН им. А.Н.Фрумкина)

Проведен анализ отличительных признаков взрывов радиационно-химических систем ядерного топливного цикла, особенностей влияния ионизирующего излучения на показатели пожаровзрывоопасности химических систем ядерного топливного цикла. Рассмотрены актуальные научные проблемы, относящиеся к обеспечению взрывобезопасности технологических процессов ядерного топливного цикла.

► **Ключевые слова:** взрывоопасность, ионизирующее излучение, ядерный топливный цикл.

ABOUT SPECIFIC PREVENTATION OF EXPLOSION DANGER AT FUEL CYCLE FACILITIES

Sokolov I.P., Ph.D., Nazin E.R., Ph.D.,
Sharafutdinov R.B., Ph.D. (SEC NRS),
Kudryavtsev E.G., Ph.D. (Rostekhnadzor), Belova E.V., Ph.D.,
Myasoedov B.F., Academician (IFCE RAS)

The analysis of specific sign of explosion of radiation-chemical systems at fuel cycle facilities, of specific influence of ionizing radiation on fire-explosion indexes of chemical systems at fuel cycle facilities is suggested. The actual scientific problems about explosion safety of technological processes at fuel cycle facilities are considered.

► **Key words:** explosion danger, ionizing radiation, fuel cycle facilities.

В системе обеспечения ядерной и радиационной безопасности объектов использования атомной энергии одной из наиболее важных составляющих является предотвращение взрывоопасности объектов ядерного топливного цикла (ОЯТЦ). Это обусловлено масштабом ущерба, причиняемого персоналу (работникам), имуществу и нанесением вреда окружающей природной среде при аварийных взрывах на ОЯТЦ.

Риск аварийных взрывов в разной степени проявляется для разных видов ОЯТЦ: ядерных установок различного типа; радиационных источников; пунктов хранения ядерных материалов и радиоактивных веществ, хранилищ радиоактивных отходов; пунктов захоронения радиоактивных отходов [1]. В наибольшей степени взрывоопасность присуща ядерным установкам, а среди них – установкам, предназначенным для переработки ядерного топлива и ядерных материалов.

Известно, что аварии на предприятиях по переработке облученного (отработавшего) ядерного топлива, связанные со взрывами, считаются одними из наиболее серьезных по своим последствиям [2].

О степени взрывоопасности ОЯТЦ свидетельствует, например, опыт эксплуатации радиохимических предприятий (РХП). В результате взрывов на РХП имели место крупные аварии (уровней 3–6 по 7-уровневой шкале ИНЕС), зафиксированы факты гибели людей и пострадавших от взрывов, случаи радиоактивного загрязнения окружающей среды.

Взрывы происходили на ОЯТЦ при осуществлении следующих процессов [3,4]:

- растворение отработавшего ядерного топлива;
- осветление растворов;
- отделение урана и плутония от других актиноидов методом жидкостной экстракции;
- аффинаж плутония;
- упаривание растворов средней активности и высокоактивных растворов;
- денитрация плава уранилнитрата;
- приготовление гидразиннитрата;
- упаривание азотнокислых растворов, содержащих восстановители;
- использование гидразина в качестве восстановителя;
- сорбционное извлечение продуктов деления;
- электрохимическое и каталитическое восстановление урана;
- электролитическое растворение оксида плутония;

- спекание порошков оксидов урана и плутония в смеси водорода и аргона;
- обращение с порошками диоксида урана и металлического плутония;
- хранение высокоактивных жидких растворов, перлитных суспензий, отработавшего экстрагента.

Разнообразие типов оборудования ОЯТЦ и осуществляемых в нем процессов является препятствием для разработки унифицированных мер по предотвращению взрывоопасности этих объектов и требует учета их специфики и группирования по типам взрывоопасности. Так, для РХП более типичны «термохимические» взрывы, для хранилищ РАО – «термобарические».

Радиационный фактор взрывов на ОЯТЦ

Анализ произошедших аварий показывает, что, в целом, взрывы на ОЯТЦ характеризуются рядом отличительных признаков, к основным из которых можно отнести следующие:

- наличие дополнительного поражающего фактора (радиационного воздействия), который является основным фактором аварии на ОЯТЦ;
- наличие постоянно действующего внутреннего источника энергии (радиоактивного распада радионуклидов), который может служить источником зажигания и инициировать возникновение взрыва;
- наличие постоянно действующего источника образования пожаровзрывоопасных веществ и смесей (в результате процессов радиолиза);
- ухудшение значений пожаровзрывоопасных показателей веществ и материалов при наличии в них радионуклидов (в том числе обуславливающее перевод жидкостей из разряда горючих в разряд легковоспламеняющихся жидкостей).

Приведенные отличительные признаки позволяют квалифицировать взрывы на ОЯТЦ (в отличие от ядерных, физических, химических, природных взрывов) как самостоятельный специфичный вид взрывов (аварии), а технологическую среду ОЯТЦ – как радиационно-химическую технологическую среду.

Взрыв радиационно-химических технологических сред объектов ЯТЦ представляет собой комплексную опасность, обусловленную такими факторами, как: механические разрушения, химическое воздействие отравляющих веществ и агрессивных сред, радиационное воздействие на работников (персонал), население и окружающую среду.

Наибольшую опасность при этом представляет ядерная и радиационная опасность.

С учетом [5], можно дать следующее определение: «радиационно-химический взрыв – быстрое химическое превращение радиационно-химической технологической среды, сопровождающееся выделением энергии, сжатых газов, ядерных материалов, радиоактивных веществ и ионизирующего излучения».

Радиационно-химический взрыв представляет собой предельный по отношению к возрастанию мощности режим протекания экзотермической реакции в радиационно-химической технологической системе с выделением химической энергии, сосредоточенной в химических связях соединений, нагретыми и сжатыми продуктами реакции.

Радиационно-химический взрыв характеризуется исходным событием, путями протекания и последствиями.

Исходное событие взрыва состоит в образовании в системе критического количества химически активных частиц (атомов, ионов, радикалов, молекул в возбужденных состояниях), которые инициируют неконтролируемую экзотермическую реакцию, самоускоряющуюся вследствие роста температуры и концентрации активных частиц, образующихся по разветвляющимся цепям. Оно проявляется в относительно длительном незначительном отклонении контролируемых показателей технологического процесса от показателей нормальной эксплуатации (период индукции) с последующим внезапным и значительным их отклонением от требований технологического регламента.

Исходное событие радиационно-химического взрыва в значительной степени зависит от действия ионизирующего излучения и продуктов радиоактивного распада на образование химически активных частиц, пропорциональное поглощенной дозе излучения, на накопление в системе электрического заряда, на условия испарения частиц из конденсированных сред, адсорбцию, полимеризацию, коллоидообразование в системе.

Пути протекания радиационно-химического взрыва зависят от его мощности и определяются количеством выделяющихся по неконтролируемой экзотермической реакции нагретых и сжатых газообразных продуктов, скачкообразным повышением давления в системе, преодолением сжатым газом сопротивления защитных барьеров ОЯТЦ, расширением газа и выбросом радиационно-химической технологической среды ОЯТЦ в окружающую среду.

Последствия радиационно-химического взрыва обусловлены степенью радиационного и других видов воздействия на работников (персонал), население, окружающую среду.

Образование взрывоопасных смесей в радиационно-технологических системах ОЯТЦ

Оценка пожаровзрывоопасности ОЯТЦ и обоснование мер по ее предотвращению проводятся на основе использования показателей пожаровзрывоопасности веществ и материалов, выбор которых зависит от агрегатного состояния вещества и условий его применения [5,6].

Ядерные материалы и радиоактивные вещества, используемые в данных процессах, могут находиться в виде: взрывоопасных веществ, взрывоопасных смесей, воспламеняющихся газов, горючих веществ, горючих жидкостей, горючей среды, окислителей.

Постоянно присутствующим в радиационно-химических технологических системах ОЯТЦ взрывоопасным веществом является водород, который образуется в ряде технологических процессов и является обязательным продуктом радиолитических водных растворов и органических фаз. Он образует взрывоопасные смеси с кислородом и воздухом. В [2] отмечено, что радиолитический водород образуется под действием излучения со скоростью $1 \text{ см}^3/(\text{Вт}\cdot\text{ч})$; герметичные сосуды могут взрываться просто по причине повышенного давления.

Взрывоопасным веществом является также соединение водорода с кислородом – пероксид водорода, который образуется в результате радиолитического водных растворов.

Ряд взрывоопасных веществ содержится в применяемых на РХП технологических системах, состоящих из водородо- и кислородосодержащих соединений азота.

К взрывоопасным веществам, сведения о которых приведены в научной и учебной литературе, относят: NH_4NO_3 , N_2H_4 , $\text{H}_2\text{N}_2\text{O}_2$, HN_3O_4 , H_3NO_4 , HN_3 и ряд азидов, а также взрывоопасные смеси сильных восстановителей с сильными окислителями этих систем и соединения, в которых имеются атомы азота как с большими положительными, так и с большими отрицательными степенями окисления.

Взрывоопасными технологическими средами являются химические системы, состоящие из

органических веществ (экстрагентов и разбавителей), азотной кислоты высокой концентрации, нитратов металлов, а также из ионоселективных сорбентов (полимеров с высокоразвитой поверхностью) и азотной кислоты высокой концентрации, ионоселективных сорбентов, содержащих нитраты металлов. Они представляют собой смеси горючих веществ с окислителями. К ним относятся многокомпонентные системы следующих типов: ТБФ-разбавитель – азотная кислота – нитрат актинида – вода; ионообменный сорбент – азотная кислота – нитрат актинида – вода.

Ряд радиоактивных веществ (диоксид урана, гидрид урана, нитрид урана, порошки урана и плутония и др.) являются пирофорными и способны самовозгораться на воздухе с переходом реакции в режим взрыва.

Изменение значений показателей пожаровзрывоопасности под действием ионизирующего излучения

Существенное значение для оценки пожаровзрывоопасности ОЯТЦ и обоснования мер по предотвращению пожаровзрывоопасности ОЯТЦ имеет то обстоятельство, что ионизирующее излучение изменяет значения показателей пожаровзрывоопасности веществ и материалов технологических сред ОЯТЦ.

Влияние ионизирующего излучения на значения показателей пожаровзрывоопасности веществ и материалов технологических сред ОЯТЦ зависит от вида ионизирующего излучения, поглощенной дозы ионизирующего излучения, способа облучения.

Особенности радиационного воздействия на технологические среды ОЯТЦ приведены в [7]:

- при переработке водных растворов облученного ядерного топлива экстракционная система подвергается радиационному воздействию, главным образом, вследствие гамма- и бета-излучения продуктов деления урана;
- основной вклад в дозу, поглощенную экстрагентом, вносит излучение бета-активных элементов (70 – 85 %), остальной вклад в радиационную нагрузку за цикл обусловлен воздействием альфа-излучения актинидов, находящихся в органической фазе до их рекстракции.

В [8] отмечено, что с увеличением дозы гамма-излучения от внешнего источника (^{60}Co):

- снижается температура начала газовой выделения;
- повышается максимальная скорость газовой

выделения (для сорбционных систем, особенно при дозах облучения 80 – 100 Вт·ч/л);

- уменьшается продолжительность периода индукции;
- снижается температура начала экзотермических процессов («стартовая» температура теплового взрыва).

В [4] приведена следующая сравнительная характеристика значений показателей пожаровзрывоопасности для облученных и необлученных экстракционных и сорбционных смесей:

- в открытом сосуде температура начала газовой выделения для смесей трибутилфосфата и его растворов в углеводородных разбавителях с азотной кислотой концентрации 12 моль/л составляет 80 – 90 °С, максимальная скорость газовой выделения для необлученных смесей – 1,5 л/мин·л экстрагента, для облученных – 4 л/мин·л экстрагента;
- в открытых сосудах температура начала газовой выделения для смесей сорбентов с азотной кислотой 7 и 12 моль/л при наличии раствора между гранулами сорбента составляет, соответственно, 70 и 60 °С, максимальная скорость газовой выделения для необлученных смесей при температуре 100 °С – 0,8 – 1,2 л/мин·л сорбента, для облученных – 2,3 – 2,5 л/мин·л сорбента;
- для смесей трибутилфосфата и его растворов в углеводородных разбавителях с азотной кислотой концентрации 3 – 12 моль/л величины температур возникновения теплового взрыва составляют 125 – 140 °С для необлученных смесей и 110 – 120 °С – для облученных смесей, удельный объем газообразных продуктов теплового взрыва после завершения теплового взрыва – 1,5 – 2,0 м³/л экстрагента.

Таким образом, можно заключить, что влияние ионизирующего излучения на значения показателей пожаровзрывоопасности технологических сред ОЯТЦ существенно и его необходимо учитывать при определении безопасных условий проведения технологических процессов.

Особенно, такой учет необходим при разработке новых технологических процессов для ОЯТЦ. Как известно, повышенная частота аварийных взрывов происходила именно на этапе освоения технологических процессов.

Направления исследований по предотвращению взрывоопасности ОЯТЦ

Введение в 2014 г. в «Общие положения обеспечения безопасности объектов ядерного топливного

цикла» подраздела «Пожаровзрывоопасность» свидетельствует о повышенном внимании регулирующего органа к совершенствованию мер по предотвращению взрывоопасности ОЯТЦ. Это стимулирует развитие научного направления, которое ставит своей целью обоснование взрывобезопасных условий осуществления технологических процессов ОЯТЦ.

Результаты проведенных научных исследований в рамках данного направления изложены в ряде публикаций, в том числе [9 – 12].

Среди ряда научных проблем, решение которых должно способствовать повышению пожаровзрывобезопасности ОЯТЦ, можно выделить следующие:

- идентификация границ режимов горения и взрыва радиационно-технологических сред ОЯТЦ по значениям показателей пожаровзрывоопасности веществ и материалов, полученным для модельных смесей;
- обоснование количества взаимосвязанных параметров пожаровзрывоопасных технологических процессов ОЯТЦ (с учетом влияния ионизирующего излучения), необходимого и достаточного для установления пределов безопасной эксплуатации ОЯТЦ;

- определение условий перехода самовоспламенения пирофорных ядерных материалов и радиоактивных веществ в режим взрыва и разработка мер по предотвращению взрывов;
- разработка классификации систем и элементов ОЯТЦ по их влиянию на взрывоопасность;
- обоснование общих и специальных мер и требований по предотвращению взрывоопасности ОЯТЦ.

Выводы

1. Проведен анализ отличительных признаков взрывов радиационно-химических сред ОЯТЦ, отмечена необходимость учета радиационного фактора при оценке условий их возникновения.
2. Проведен анализ особенностей влияния ионизирующего излучения на значения показателей пожаровзрывоопасности технологических систем ОЯТЦ, которые необходимо учитывать при установлении пределов безопасной эксплуатации.
3. Определены актуальные научные проблемы, относящиеся к обеспечению пожаровзрывобезопасности ОЯТЦ.

Список литературы

1. Общие положения обеспечения безопасности объектов ядерного топливного цикла (ОПБ ОЯТЦ). НП-016-05, М., НТЦ ЯРБ, 2005. (Бюллетень нормативных актов федеральных органов исполнительной власти, № 42, 20.10.2014).
2. Громов Б.В., Савельева В.И., Шевченко В.Б. Химическая технология облученного ядерного топлива. М., Энергоатомиздат, 1983.
3. Безопасность ядерного топливного цикла. М., Информ-Атом, 2002.
4. Положение об оценке пожаровзрывобезопасности технологических процессов радиохимических производств. РБ-060-10, М., НТЦ ЯРБ, 2010.
5. Технический регламент о требованиях пожарной безопасности: федер. закон Рос. Федерации от 22 июля 2008 г. №123-ФЗ: принят Гос. Думой 4 июля 2008 г.: одобр. Советом Федерации Федер. Собр. Рос. Федерации 11 июля 2008 г.
6. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов. Номенклатура показателей и методы их определения. ГОСТ 12.1.044-89.
7. Егоров Г.Ф. Радиационная химия экстракционных систем. М., Энергоатомиздат, 1986.
8. Назин Е.Р., Зачиняев Г.М. Пожаровзрывобезопасность технологических процессов радиохимических производств. М., НТЦ ЯРБ, 2009.
9. Тхоржницкий Г.П., Белова Е.В., Тананаев И.Г. и др. Влияние собственного альфа-излучения Pu-239 на его экстракцию 40 % раствором три-н-бутилфосфата в формале n2. Радиохимия, Т.55, вып.1, 2013.
10. Белова Е.В., Родин А.В., Тхоржницкий Г.П. и др. Действие ускоренных электронов на экстракцию плутония 40 % раствором ТБФ в формале n2 в условиях циклического режима использования экстрагента. Радиохимия, Т.55, вып.1, 2013.
11. Назин Е.Р., Белова Е.В., Мясоедов Б.Ф. и др. Термическая стабильность двухфазных смесей деградированного ТБФ с HNO₃ в парафиновых углеводородах при давлении выше атмосферного (в закрытом сосуде). Вопросы радиационной безопасности, № 2, 2013.
12. Дживанова З.В., Белова Е.В., Мясоедов Б.Ф. и др. Радиационная стойкость углеводородных разбавителей трибутилфосфата в двухфазной системе и карбонатная регенерация экстрагента. Радиохимия, Т. 57, вып. 2, 2015.