



ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА  
ПО ЭКОЛОГИЧЕСКОМУ, ТЕХНОЛОГИЧЕСКОМУ И АТОМНОМУ НАДЗОРУ  
(РОСТЕХНАДЗОР)

П Р И К А З

14 марта 2017 г.

№ 89

Москва

**Об утверждении руководства по безопасности при использовании  
атомной энергии «Оценка взрывопожароопасности сорбционных систем  
при переработке отработавшего ядерного топлива»**

В целях реализации полномочий, установленных подпунктом 5.3.18 Положения о Федеральной службе по экологическому, технологическому и атомному надзору, утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 30 июля 2004 г. № 401, приказываю:

Утвердить прилагаемое к настоящему приказу руководство по безопасности при использовании атомной энергии «Оценка взрывопожароопасности сорбционных систем при переработке отработавшего ядерного топлива».

Руководитель

А.В. Алёшин

**ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА ПО ЭКОЛОГИЧЕСКОМУ,  
ТЕХНОЛОГИЧЕСКОМУ И АТОМНОМУ НАДЗОРУ**

---

**УТВЕРЖДЕНО**  
приказом Федеральной службы  
по экологическому, технологическому  
и атомному надзору  
от 17 марта 2017 г. № 89

**РУКОВОДСТВО ПО БЕЗОПАСНОСТИ  
ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ**

**«ОЦЕНКА ВЗРЫВОПОЖАРООПАСНОСТИ СОРБЦИОННЫХ  
СИСТЕМ ПРИ ПЕРЕРАБОТКЕ ОТРАБОТАВШЕГО  
ЯДЕРНОГО ТОПЛИВА»  
(РБ-125-17)**

*Текст  
соответствует  
утвержденному*  
*Поминин А.В.*  
*27.03.17.*

Введено в действие  
с 17 марта 2017 г.

Москва 2017

**Руководство по безопасности при использовании атомной энергии  
«Оценка взрывопожароопасности сорбционных систем при переработке  
отработавшего ядерного топлива» (РБ-125-17)**

**Федеральная служба по экологическому, технологическому  
и атомному надзору, Москва, 2017**

Настоящее руководство по безопасности при использовании атомной энергии «Оценка взрывопожароопасности сорбционных систем при переработке отработавшего ядерного топлива» (далее – Руководство по безопасности) (РБ-125-17) разработано в соответствии со статьей 6 Федерального закона от 21 ноября 1995 г. № 170-ФЗ «Об использовании атомной энергии» в целях содействия соблюдению требований пунктов 6.7.7.1 – 6.7.7.3 и 6.7.11 федеральных норм и правил в области использования атомной энергии «Общие положения обеспечения безопасности объектов ядерного топливного цикла», утвержденных постановлением Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 2 декабря 2005 г. № 11 (зарегистрирован Минюстом России 1 февраля 2006 г., регистрационный № 7433).

Настоящее Руководство по безопасности содержит рекомендации Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору по проведению оценки взрывопожароопасности систем, предназначенных для выполнения функций разделения/очистки технологических сред сорбционными методами на проектируемых, сооружаемых и эксплуатируемых объектах ядерного топливного цикла, осуществляющих переработку отработавшего ядерного топлива.

Выпускается впервые.<sup>1</sup>

---

<sup>1</sup> Разработано коллективом авторов в составе: Родина А.В., к.х.н., Познизова А.В., Анисимов Н.А. (ФБУ «НТЦ ЯРБ»), Обручникова А.В., к.х.н. (Ростехнадзор), Косого А.А., к.т.н. (ФГУП РНЦ «Прикладная химия»).

При разработке учтены замечания и предложения ФГУП ПО «Маяк», АО «СХК», ФГБУ ВНИИПО МЧС России, ИПХФ РАН, АО «АТОМПРОЕКТ» и других заинтересованных организаций и ведомств.

## **I. Общие положения**

1. Руководство по безопасности при использовании атомной энергии «Оценка взрывопожароопасности сорбционных систем при переработке отработавшего ядерного топлива» (далее – Руководство по безопасности) (РБ-125-17) разработано в соответствии со статьей 6 Федерального закона от 21 ноября 1995 г. № 170-ФЗ «Об использовании атомной энергии» в целях содействия соблюдению требований пунктов 6.7.7.1 – 6.7.7.3 и 6.7.11 федеральных норм и правил в области использования атомной энергии «Общие положения обеспечения безопасности объектов ядерного топливного цикла», утвержденных постановлением Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 2 декабря 2005 г. № 11 (зарегистрирован Минюстом России 1 февраля 2006 г., регистрационный № 7433).

2. Настоящее Руководство по безопасности содержит рекомендации Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору по проведению оценки взрывопожароопасности систем, предназначенных для выполнения функций разделения/очистки технологических сред сорбционными методами на проектируемых, сооружаемых и эксплуатируемых объектах ядерного топливного цикла (далее – ОЯТЦ), осуществляющих переработку отработавшего ядерного топлива.

3. Действие настоящего Руководства по безопасности распространяется на ОЯТЦ, на которых осуществляются технологические процессы с применением сорбционных методов разделения/очистки технологических сред при переработке отработавшего ядерного топлива.

4. Настоящее Руководство по безопасности предназначено для применения эксплуатирующими организациями при проектировании, сооружении, эксплуатации ОЯТЦ, для которых предусмотрены технологические процессы с использованием сорбционных методов

разделения/очистки технологических сред при переработке отработавшего ядерного топлива, а также специалистами Ростехнадзора при осуществлении ими лицензионной (разрешительной) деятельности или федерального государственного надзора в области использования атомной энергии.

5. Оценка взрывопожароопасности сорбционных систем при переработке отработавшего ядерного топлива может быть выполнена с использованием иных методов, чем те, которые содержатся в настоящем Руководстве по безопасности, при обоснованности выбранных методов для обеспечения безопасности.

6. Результаты оценки взрывопожароопасности сорбционных систем рекомендуется включать в документы, обосновывающие обеспечение безопасности ОЯТЦ и представляемые эксплуатирующей организацией для получения лицензии на виды деятельности в области использования атомной энергии. Термины и определения, используемые в настоящем Руководстве по безопасности, приведены в приложении № 1.

## **II. Общие рекомендации**

7. Оценку взрывопожароопасности сорбционных систем рекомендуется выполнять для:

оценки взрывопожароопасности ОЯТЦ, включающих сорбционные системы;

выявления наиболее значимых для предотвращения взрывопожароопасности сорбционных системы ОЯТЦ исходных событий, аварийных последовательностей, систем (элементов), действий персонала;

определения приоритетов при разработке и реализации мероприятий, направленных на обеспечение безопасности сорбционных систем ОЯТЦ;

оценки влияния мероприятий по модернизации систем (элементов) на безопасность ОЯТЦ, включающих сорбционные системы;

оценки влияния нарушений в работе ОЯТЦ, включающих сорбционные системы;

оптимизации проектных решений;  
уточнения перечня аварий, разработки мер по управлению авариями,  
оценки эффективности мер по управлению авариями;  
получения данных для разработки технических решений по управлению аварией;  
обоснования пределов и условий безопасной эксплуатации ОЯТЦ, включающих сорбционные системы;  
обоснования внесения изменений в проектную, конструкторскую, технологическую и эксплуатационную документацию.

8. Оценку взрывопожароопасности сорбционных систем рекомендуется проводить с учетом:

свойств потенциально опасных веществ и материалов, находящихся в сорбционных системах;

проектно-конструкторской и эксплуатационной документации по сорбционным системам;

актов испытаний и другой документации по техническому обслуживанию и ремонту систем (элементов) безопасности и элементов, важных для безопасности ОЯТЦ, включающих сорбционные системы;

информации об отказах элементов систем, важных для безопасности, и ошибках персонала на ОЯТЦ, включающих сорбционные системы;

сведений о расследовании нарушений и анализа отклонений в работе сорбционных систем;

сведений о нарушении пределов и условий безопасной эксплуатации.

9. Допущения, принятые при выполнении оценки взрывопожароопасности сорбционных систем ОЯТЦ, рекомендуется обосновывать.

### **III. Рекомендации по этапам оценки взрывопожароопасности сорбционных систем**

10. Оценку взрывопожароопасности сорбционных систем,

используемых при технологических операциях по переработке отработавшего ядерного топлива, рекомендуется проводить в следующей последовательности (схема проведения оценки приведена в приложении № 2 к настоящему Руководству по безопасности).

### **10.1. Выявление потенциально опасных веществ и материалов**

Рекомендуется провести анализ технологических операций (например, сорбция, десорбция, промывка), осуществляемых в сорбционной системе с целью определения потенциально пожаровзрывоопасных веществ и материалов, которые образуются или могут образоваться в условиях нормальной эксплуатации. Рекомендуется оценить состав, представляющий наибольшую опасность при проведении технологической операции.

Для этого следует рассмотреть вещества и материалы с максимальной концентрацией окислителя и восстановителя; с максимальным удельным тепловыделением вследствие радиоактивного распада; подвергающиеся максимальному радиационному воздействию; с минимальной теплопроводностью; другие вещества и материалы, представляющие опасность из-за возможности протекания неуправляемых реакций.

### **10.2. Оценка тепловых эффектов и объема газообразных продуктов неуправляемых реакций, способных протекать в сорбционной системе**

При использовании методов расчета рекомендуется:

привести перечень неуправляемых реакций, способных протекать в потенциально пожаровзрывоопасных веществах и материалах выявленного состава, и составить для них химические уравнения. При отсутствии необходимых данных о продуктах реакций составить уравнения химических реакций, руководствуясь принципом максимального тепловыделения, при котором в качестве продуктов реакций задаются вещества с наименьшей суммой энтальпий образования;

рассчитать суммарный и удельный экзотермические эффекты неуправляемых реакций, суммарное количество газообразных продуктов

по химическим уравнениям, известным термодинамическим данным, количественному содержанию веществ для степени протекания реакций (глубины превращения), равной 1 (100 %). При отсутствии необходимых термодинамических данных для расчета теплового эффекта неуправляемых реакций с целью их определения использовать экспериментальные методы, методы расчета, методы сравнительного анализа.

При использовании экспериментальных методов рекомендуется:

определить тепловой эффект и объем газообразных продуктов неуправляемых реакций для модельного или реального состава веществ, находящихся в сорбционной системе;

скорректировать полученные значения теплового эффекта и объема газообразных продуктов в случае необходимости учета вклада тепловых потерь и неполноты протекания неуправляемых реакций в условиях проведения эксперимента.

Значения теплового эффекта и объема газообразных продуктов неуправляемых реакций, принимаемые для проведения дальнейшей оценки, рекомендуется обосновать.

### **10.3. Оценка адиабатической (максимально возможной) температуры и объема газообразных веществ, находящихся в сорбционной системе, достигаемой в результате протекания неуправляемых реакций**

На данном этапе проведения оценки взрывопожароопасности сорбционных систем ОЯТЦ рекомендуется:

рассчитать адиабатический разогрев веществ за счет протекания неуправляемых реакций;

рассчитать объем и возможное давление газообразных продуктов неуправляемых реакций, соответствующие адиабатической температуре для условий открытого и закрытого аппарата (сорбционной колонны);

оценить достигаемую за время проведения технологической операции концентрацию горючих газов в свободном объеме аппарата;

при отсутствии необходимых данных для проведения расчета с целью



их определения возможно использование экспериментальных методов, методов сравнительного анализа;

перейти к проведению оценки по пункту 10.7, если для заданного состава рассчитанные значения адиабатической температуры, объема и давления (в случае возможной герметизации колонны) газообразных продуктов неуправляемых реакций, концентрация горючих газов меньше установленных для сорбционной системы пределов безопасной эксплуатации по соответствующим параметрам, если нет – перейти к проведению оценки по пункту 10.4.

#### **10.4. Оценка адиабатического (минимально возможного) периода индукции теплового взрыва от протекания в сорбционной системе неуправляемых реакций**

При проведении оценки адиабатического (минимально возможного) периода индукции теплового взрыва от протекания в сорбционной системе неуправляемых реакций (рекомендации по проведению оценки приведены в приложении № 3 к настоящему Руководству по безопасности) рекомендуется:

создать кинетическую модель неуправляемых реакций и определить ее параметры, позволяющие рассчитывать изменение температуры и глубины превращения во времени; рекомендуется, чтобы полученная кинетическая модель отражала основные особенности протекания неуправляемых реакций, такие как:

каталитическое влияние примесей/конструкционных материалов/ионизирующего излучения;

автокатализ;

наличие радиогенного источника тепла;

определить зависимость периода индукции теплового взрыва от начальной температуры веществ по полученной кинетической модели;

рассчитать объем и возможное давление газообразных продуктов неуправляемых реакций, соответствующие достигаемым за время операции

температуре и глубине превращения, для условий открытого и закрытого аппарата (сорбционной колонны);

оценить достигаемую за время проведения технологической операции концентрацию горючих газов в свободном объеме аппарата;

использовать экспериментальные методы, методы сравнительного анализа с целью определения отсутствующих данных, необходимых для проведения расчета;

перейти к проведению оценки по пункту 10.7, если полученное значение адиабатического периода индукции теплового взрыва для начальной температуры смеси, равной регламентной, больше времени осуществления технологической операции в сорбционной системе, а достигаемые за время осуществления операции такие параметры, как температура, объем и давление (в случае возможной герметизации колонны) газообразных продуктов, концентрация горючих газов, меньше установленных для сорбционной системы пределов безопасной эксплуатации по соответствующим параметрам, если нет – перейти к проведению оценки по пункту 10.5.

#### **10.5. Оценка критической температуры теплового взрыва от протекания неуправляемых реакций в условиях тепловых потерь в окружающую среду**

При проведении оценки критической температуры теплового взрыва от протекания неуправляемых реакций в условиях тепловых потерь в окружающую среду (рекомендации по проведению приведены в приложении № 4 к настоящему Руководству по безопасности) рекомендуется:

рассчитать изменение температуры веществ в сорбционной системе в течение времени протекания неуправляемых реакций для данных условий тепловых потерь в окружающую среду при различных начальных температурах;

учесть вклад и значимость составляющих теплового баланса при проведении расчета: теплового эффекта неуправляемых реакций; тепловыделения в результате радиоактивного распада радионуклидов;

эндотермических эффектов физических и химических процессов, сопровождающих протекание неуправляемых реакций; количества тепла, передающегося в объеме технологической среды в процессе протекания неуправляемых реакций; тепловых потерь в окружающую среду;

обосновать применимость принятых составляющих и значений параметров уравнения теплового баланса, начальных и граничных условий протекания неуправляемых реакций;

определить критическую температуру теплового взрыва по рассчитанным зависимостям;

рассчитать объем и возможное давление газообразных продуктов реакций, соответствующие достигаемым за время операции температуре и глубине превращения для условий открытого и закрытого аппарата (сорбционной колонны), если температура проведения технологической операции (стенки сорбционной колонны) ниже критической температуры теплового взрыва;

оценить достигаемую за время проведения технологической операции концентрацию горючих газов в свободном объеме аппарата;

перейти к проведению оценки по пункту 10.7, если температура проведения технологической операции (стенки сорбционной колонны) ниже критической температуры теплового взрыва, а достигаемые за время осуществления операции такие параметры, как температура, объем и давление (в случае возможной герметизации колонны) газообразных продуктов, концентрация горючих газов, меньше установленных пределов безопасной эксплуатации для сорбционной системы по соответствующим параметрам, если нет – перейти к проведению оценки по пункту 10.6.

#### **10.6. Оценка периода индукции теплового взрыва от протекания в сорбционной системе неуправляемых реакций в условиях тепловых потерь в окружающую среду**

При проведении оценки периода индукции теплового взрыва от протекания в сорбционной системе неуправляемых реакций в условиях

тепловых потерь в окружающую среду (рекомендации по проведению приведены в приложении № 5 к настоящему Руководству по безопасности) рекомендуется:

определить период индукции теплового взрыва по рассчитанной зависимости изменения температуры веществ в сорбционной колонне в течение времени протекания неуправляемых реакций для данных условий тепловых потерь в окружающую среду;

рассчитать объем и возможное давление газообразных продуктов неуправляемых реакций, соответствующие достигаемым за время операции температуре и глубине превращения для условий открытого и закрытого аппарата (сорбционной колонны);

оценить достигаемую за время проведения технологической операции концентрацию горючих газов в свободном объеме аппарата;

перейти к проведению оценки по пункту 10.7, если определенное значение периода индукции больше времени осуществления технологической операции в сорбционной системе, а достигаемые за время осуществления операции такие параметры, как температура, объем и давление (в случае возможной герметизации колонны) газообразных продуктов, концентрация горючих газов, меньше установленных пределов безопасной эксплуатации для сорбционной системы по соответствующим параметрам, если нет – считать сорбционную систему взрывопожароопасной и принять меры по предотвращению ее взрывопожароопасности.

#### **10.7. Оценка влияния отклонений параметров технологического процесса на взрывопожароопасность сорбционных систем**

При проведении оценки влияния отклонений параметров технологического процесса на взрывопожароопасность сорбционных систем (рекомендации по проведению приведены в приложении № 6 к настоящему Руководству по безопасности) рекомендуется:

сформировать перечень возможных отклонений параметров

технологического процесса на основании опыта эксплуатации сорбционной системы, в состав которой входит рассматриваемый технологический процесс, анализа отклонений для аналогичных технологических процессов, консервативных предположений по отказу систем (элементов);

обратить особое внимание на отклонения параметров системы от параметров нормальной эксплуатации, приводящие к образованию нерассмотренных потенциально опасных веществ и материалов; к таким отклонениям в том числе следует отнести: растворы с повышенной кислотностью; радиогенные источники тепла повышенной интенсивности; ошибки в последовательности и/или в составе исходных/дозиметрических компонентов; частичное или полное осушение сорбентов;

рассмотреть влияние единичных и множественных отклонений параметров технологического процесса от параметров нормальной эксплуатации на безопасность сорбционной системы и составить перечень сценариев возникновения неуправляемых реакций, достижения концентрации горючих газов и других параметров процесса пределов безопасной эксплуатации, перечень принимаемых организационно-технических мер, предотвращающих реализацию аварийных сценариев.

---

ПРИЛОЖЕНИЕ № 1  
к руководству по безопасности  
при использовании атомной энергии «Оценка  
взрывопожароопасности сорбционных систем  
при переработке отработавшего ядерного  
топлива», утвержденному приказом  
Федеральной службы по экологическому,  
технологическому и атомному надзору  
от «17» марта 2017 г. № 89

### Термины и определения

В целях настоящего Руководства по безопасности используются следующие термины и определения:

**Сорбционная система** – совокупность элементов, предназначенная для выполнения функции разделения/очистки технологических сред сорбционным методом.

**Критическая температура теплового взрыва  $T_{кр}$**  – температура окружающей среды, при которой для сорбционной колонны заданной формы и размеров при заданных условиях теплообмена с окружающей средой происходит переход от безвзрывного к взрывному режиму протекания экзотермической реакции (тепловому взрыву).

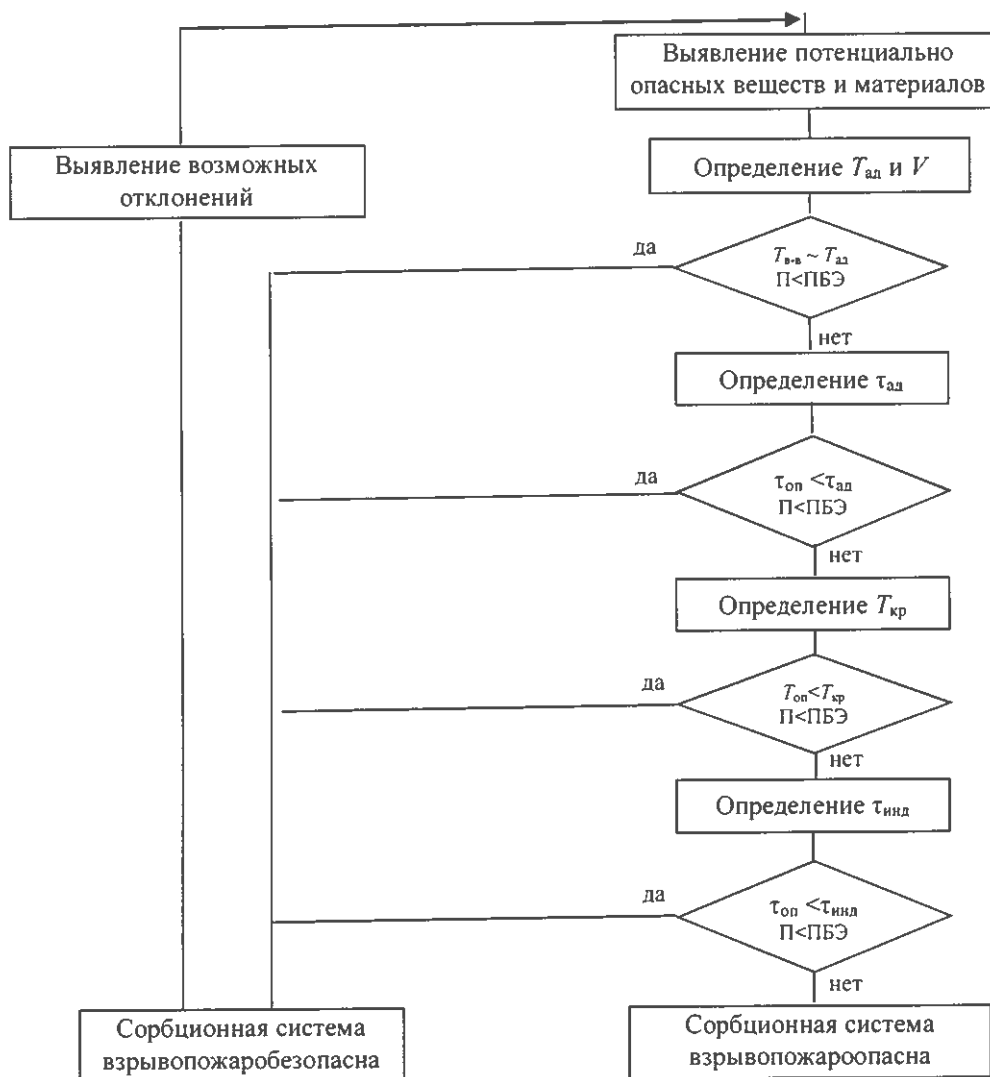
**Период индукции адиабатического теплового взрыва  $\tau_{ад}$**  – промежуток времени с начала реакции, протекающей в технологической среде, находящейся в адиабатических условиях, до момента, когда скорость реакции достигает наибольшего значения.

**Период индукции теплового взрыва  $\tau_{инд}$**  – промежуток времени с начала реакции в технологической среде до момента, когда скорость изменения максимальной температуры в сорбционной колонне достигает наибольшего значения.

---

**ПРИЛОЖЕНИЕ № 2**  
**к руководству по безопасности**  
**при использовании атомной энергии «Оценка**  
**взрывопожароопасности сорбционных систем**  
**при переработке отработавшего ядерного**  
**топлива», утвержденному приказом**  
**Федеральной службы по экологическому,**  
**технологическому и атомному надзору**  
**от «17» марта 2017 г. № 89**

**Схема проведения оценки взрывопожароопасности сорбционных систем, используемых при технологических операциях по переработке отработавшего ядерного топлива**



Примечание.

$T_{в-в}$  – температура веществ в сорбционной системе;  $T_{ад}$  – адиабатическая температура веществ в сорбционной системе после протекания неуправляемых реакций;  $V$  – объем газообразных продуктов неуправляемых реакций;  $\Pi$  – параметры процесса, достигаемые за время операции; ПБЭ – пределы безопасной эксплуатации;  $\tau_{оп}$  – время осуществления операции;  $\tau_{ад}$  – период индукции адиабатического теплового взрыва;  $T_{оп}$  – температура окружающей среды (стенки колонны);  $T_{кр}$  – критическая температура теплового взрыва;  $\tau_{инд}$  – период индукции теплового взрыва.

---



ПРИЛОЖЕНИЕ № 3  
к руководству по безопасности  
при использовании атомной энергии «Оценка  
взрывопожароопасности сорбционных систем  
при переработке отработавшего ядерного  
топлива», утвержденному приказом  
Федеральной службы по экологическому,  
технологическому и атомному надзору  
от «17» марта 2017 г. № 89

**Рекомендации  
по проведению оценки адиабатического (минимально возможного)  
периода индукции теплового взрыва от протекания в сорбционной  
системе неуправляемых реакций**

**Исходные данные**

Цель: оценить безопасность операции ожидания подачи раствора в сорбционную колонну, осуществляемой при температуре 70 °С в течение 6 часов.

Сорбционная колонна общим объемом 1 м<sup>3</sup> на 80 % заполнена сорбентом, содержащим нитратные группы.

Операция проводится при атмосферном давлении, обеспечен свободный отход газов со скоростью 0,01 м<sup>3</sup> с<sup>-1</sup>.

Для операции установлены следующие пределы безопасной эксплуатации –  $T = 80$  °С и  $P = 6$  атм;

Теплоемкость сорбента ( $C_{p, уд}$ ) равна 2 кДж кг<sup>-1</sup>.

Плотность сорбента ( $\rho$ ) равна 1000 кг м<sup>-3</sup>.

Максимальный тепловой эффект разложения ( $Q_{уд}$ ) равен 1500 кДж кг<sup>-1</sup>.

Удельный объем газообразных продуктов ( $V_{уд}$ ) равен 1 м<sup>3</sup> кг<sup>-1</sup> (при нормальных условиях).

Скоростью выделения радиолитического водорода можно пренебречь.

### Проведение оценки

На основе экспериментальных данных определено, что для указанного сорбента скорость тепловыделения ( $q$ , кДж кг<sup>-1</sup> с<sup>-1</sup>) описывается уравнением:

$$q = k_0 e^{\frac{-E_a}{RT}} (1 - \alpha) Q_{уд} \quad , \quad (1)$$

где:

$k_0$  – предэкспоненциальный множитель (с<sup>-1</sup>);

$E_a$  – энергия активации (Дж моль<sup>-1</sup>);

$R$  – универсальная газовая постоянная (Дж моль<sup>-1</sup> К<sup>-1</sup>);

$T$  – температура веществ (К);  $\alpha$  – глубина превращения;

при следующих параметрах уравнения:

$$k_0 = 19,6 \cdot 10^{10} \text{ с}^{-1}; E_a = 120 \cdot 10^3 \text{ Дж моль}^{-1}.$$

Изменение температуры веществ во времени можно рассчитать исходя из следующего уравнения:

$$\frac{dT}{d\tau} = \frac{q}{C_{p, уд}} \quad , \quad (2)$$

где  $\tau$  – время (с).

Численное решение данного уравнения при начальной температуре, равной  $T_0$ , представлено на рис. 1.

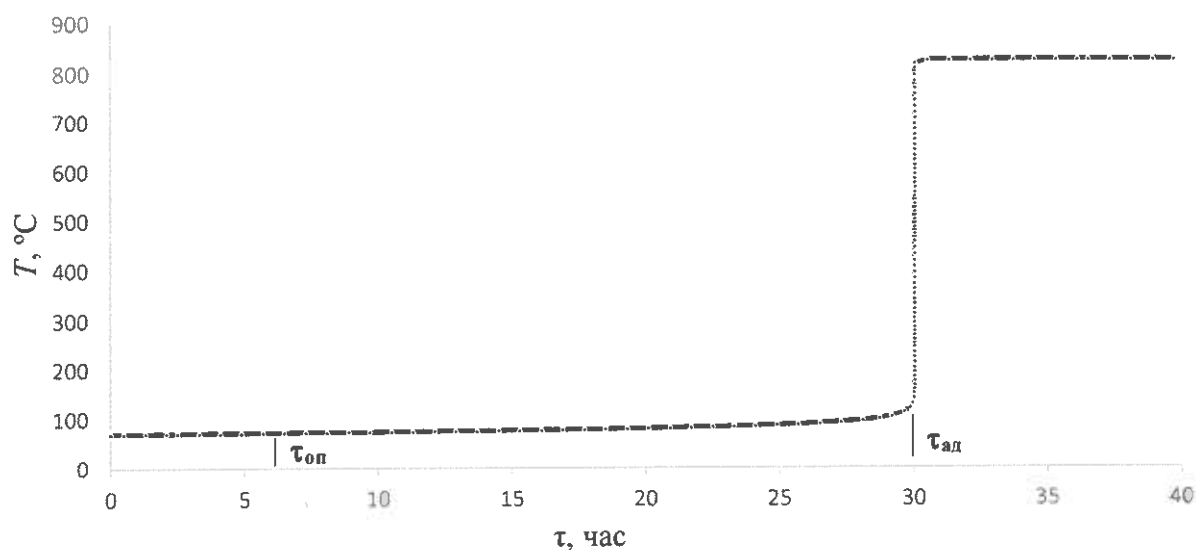


Рис. 1. Изменение температуры веществ во времени в адиабатических условиях

Определенный период индукции адиабатического теплового взрыва равен 30 часам. За время операции в 6 часов в адиабатических условиях достигается температура в 72 °С, глубина превращения составляет  $2,7 \cdot 10^{-3}$  (0,27 %), максимальная скорость изменения глубины превращения составляет  $1,3 \cdot 10^{-7} \text{ с}^{-1}$  ( $1,3 \cdot 10^{-5} \% \text{ с}^{-1}$ ). Это соответствует объему газов для всей загрузки  $2,2 \text{ м}^3$  (при нормальных условиях), или  $2,8 \text{ м}^3$  (при  $T = 72 \text{ °С}$ ) и  $1,07 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3 \text{ с}^{-1}$  (при нормальных условиях), или  $1,35 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3 \text{ с}^{-1}$  (при  $T = 72 \text{ °С}$ ) соответственно. Поскольку свободный объем колонны равен  $0,2 \text{ м}^3$ , возможное избыточное давление в случае герметизации колонны, оцененное по уравнению для идеальных газов, составляет 11 атм.

### Выводы

Если герметизация колонны невозможна, данная сорбционная система в указанных условиях является взрывопожаробезопасной, поскольку время проведения процесса значительно меньше оцененного периода индукции адиабатического теплового взрыва и за время проведения процесса пределы безопасной эксплуатации для сорбционной системы не будут нарушены.

Если возможна герметизация колонны, вывод о безопасности сорбционной системы сделать нельзя, поскольку будет нарушен предел безопасной эксплуатации по давлению для данной сорбционной системы.

---

**ПРИЛОЖЕНИЕ № 4**  
к руководству по безопасности при  
использовании атомной энергии «Оценка  
взрывопожароопасности сорбционных систем  
при переработке отработавшего ядерного  
топлива», утвержденному приказом  
Федеральной службы по экологическому,  
технологическому и атомному надзору  
от «17» марта 2017 г. № 89

**Рекомендации по проведению оценки критической температуры  
теплового взрыва от протекания неуправляемых реакций в условиях  
тепловых потерь в окружающую среду**

**Исходные данные**

Цель: оценить безопасность операции ожидания подачи раствора в сорбционную колонну, осуществляемой при температуре 70 °С в течение 6 часов.

Сорбционная колонна внутренним диаметром 20 см заполнена сорбентом, содержащим нитратные группы и равномерно распределенный радиогенный источник тепла. Общий объем загрузки колонны составляет 0,06 м<sup>3</sup>.

Теплоемкость сорбента ( $C_{p, уд}$ ) равна 2 кДж кг<sup>-1</sup>.

Плотность сорбента ( $\rho$ ) равна 1000 кг м<sup>-3</sup>.

Коэффициент теплопроводности технологической среды ( $\lambda$ ) равен  $0,6 \cdot 10^{-3}$  кДж м<sup>-1</sup> К<sup>-1</sup> с<sup>-1</sup>.

Максимальные тепловой эффект разложения ( $Q_{уд}$ ) равен 1500 кДж кг<sup>-1</sup>.

Скоростью выделения радиолитического водорода можно пренебречь.

**Проведение оценки**

На основе экспериментальных данных определено, что для указанного сорбента скорость тепловыделения ( $q$ , кДж кг<sup>-1</sup> с<sup>-1</sup>) описывается уравнением:

$$q = k_0 e^{\frac{-E_a}{RT}} (1 - \alpha) Q_{уд} + q_{rad}, \quad (1)$$

где:

$k_0$  – предэкспоненциальный множитель ( $\text{с}^{-1}$ );

$E_a$  – энергия активации ( $\text{Дж моль}^{-1}$ );

$R$  – универсальная газовая постоянная ( $\text{Дж моль}^{-1} \text{К}^{-1}$ );

$T$  – температура веществ ( $\text{К}$ );

$\alpha$  – глубина превращения.

При следующих параметрах уравнения:

$$k_0 = 19,6 \cdot 10^{10} \text{ с}^{-1}; E_a = 120 \cdot 10^3 \text{ Дж моль}^{-1}; q_{rad} = 1 \cdot 10^{-2} \text{ кДж кг}^{-1} \text{ с}^{-1}.$$

Изменение температуры веществ во времени можно рассчитать исходя из следующего уравнения:

$$\rho C_{p, \text{уд}} \frac{\partial T}{\partial \tau} = \text{div} (\lambda \text{grad} T) + \rho q. \quad (2)$$

При изменении начальных условий по температуре сорбента и стенке колонны при неизменных остальных начальных и граничных условиях рассчитывается температура, при которой происходит переход от безвзрывного к взрывному режиму протекания экзотермической реакции. Результаты расчета максимальной температуры на центральной оси колонны приведены на рис. 1 для следующих граничных и начальных условий:

граничные условия на оси колонны (для цилиндрических координат):

$$\frac{\partial T}{\partial n_{r=0}} = 0 \quad (3),$$

граничные условия на боковой поверхности:

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial n_{r=R_{\text{кол}}}} = \alpha (T_{\text{ст}} - T) \quad (4),$$

граничные условия на торцах слоя сорбента:

$$\frac{\partial T}{\partial n_{z=0}} = 0; \quad \frac{\partial T}{\partial n_{z=Z}} = 0 \quad (5),$$

начальные условия:

$$T_{\tau=0} = T_0 = 49 \text{ и } 50 \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (6)$$

где:

$n$  – вектор нормали к поверхности в данной точке, м;

$R_{кол}$  – внутренний радиус колонны 0,07 м;

$\alpha$  – коэффициент теплоотдачи 0,5 кДж м<sup>-2</sup> К<sup>-1</sup> с<sup>-1</sup>;

$T_{ст}$  – температура стенки колонны ( $T_{ст}=T_0$ ), К;

$Z_m$  – высота участка колонны, занятого сорбентом 1,9 м;

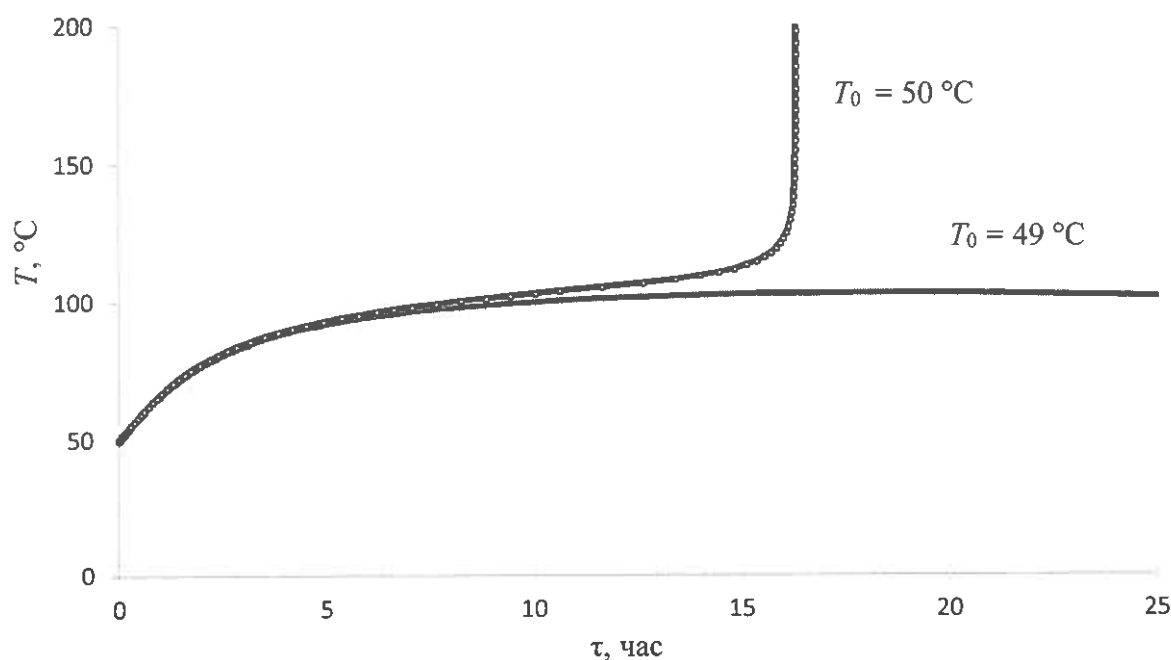


Рис. 1. Изменение максимальной температуры веществ во времени в колонне

Определенная критическая температура теплового взрыва ( $T_{кр}$ ) равна 49 °С, что является ниже температуры проведения процесса.

### Выводы

Вывод о безопасности сорбционной системы сделать нельзя, поскольку температура проведения процесса выше критической температуры теплового взрыва. Следует провести этап оценки периода индукции теплового взрыва от протекания в сорбционной системе неуправляемых реакций в условиях тепловых потерь в окружающую среду.

ПРИЛОЖЕНИЕ № 5  
к руководству по безопасности  
при использовании атомной энергии «Оценка  
взрывопожароопасности сорбционных систем  
при переработке отработавшего ядерного  
топлива», утвержденному приказом  
Федеральной службы по экологическому,  
технологическому и атомному надзору  
от «17» марта 2017 г. № 89

**Рекомендации по проведению оценки периода индукции теплового  
взрыва от протекания в сорбционной системе неуправляемых реакций  
в условиях тепловых потерь в окружающую среду**

**Исходные данные**

Аналогичны исходным данным приложения № 4.

**Проведение оценки**

Численно решив уравнение (2) приложения № 4 с такими же граничными условиями, но с начальными условиями по температуре, равной температуре проведения процесса ( $T_0 = 70\text{ °C}$ ), получается следующая зависимость максимальной температуры внутри колонны от времени (рис. 1).

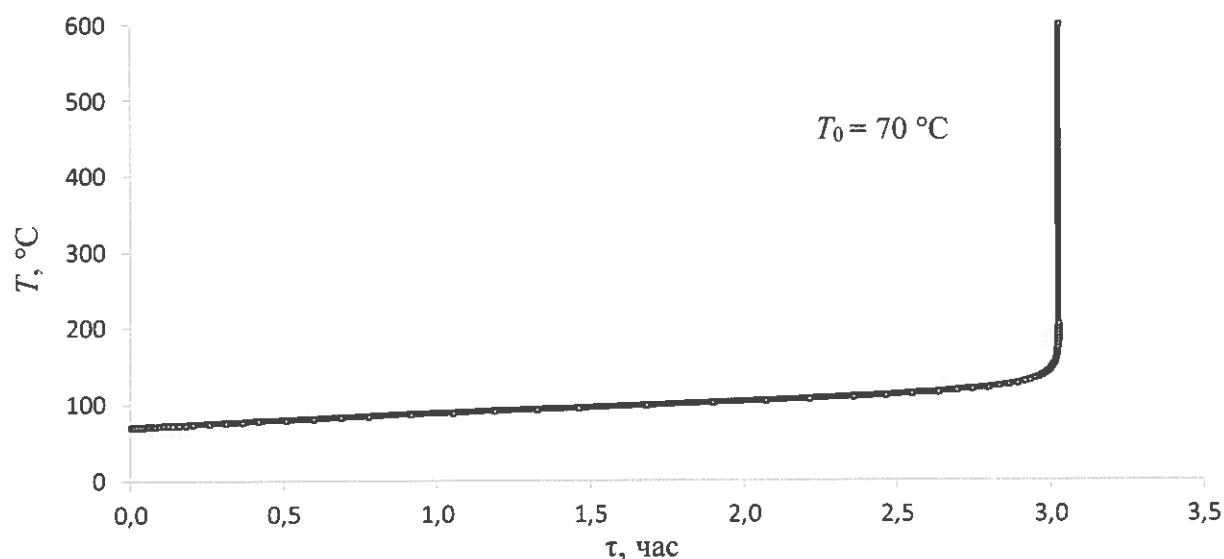


Рис. 1. Изменение максимальной температуры веществ во времени в колонне

Результаты расчета показывают, что период индукции теплового взрыва ( $\tau_{\text{инд}} = 3$  часа) меньше планируемого времени проведения процесса

( $\tau_{оп} = 6$  часов). Оцененный вклад дополнительных теплотерь не приводит к ощутимому увеличению периода индукции теплового взрыва.

### **Выводы**

Следует считать сорбционную систему взрывопожароопасной и принять меры по предотвращению ее взрывопожароопасности, поскольку полученное значение периода индукции меньше времени осуществления технологической операции в сорбционной системе.

---



ПРИЛОЖЕНИЕ № 6  
к руководству по безопасности  
при использовании атомной энергии «Оценка  
взрывопожароопасности сорбционных систем  
при переработке отработавшего ядерного  
топлива», утвержденному приказом  
Федеральной службы по экологическому,  
технологическому и атомному надзору  
от «17» марта 2017 г. № 89

**Рекомендации по проведению оценки влияния отклонений параметров  
технологического процесса на взрывопожароопасность  
сорбционных систем**

**Исходные данные**

Аналогичны исходным данным приложения № 3.

Цель: оценить отклонение температуры процесса на  $5\text{ }^{\circ}\text{C}$  в сторону  
увеличения.

**Проведение оценки**

Проведенный расчет по уравнению 2 приложения № 3 для начальной  
температуры процесса, равной  $70+5\text{ }^{\circ}\text{C}$ , дает следующие результаты  
(рис. 1).

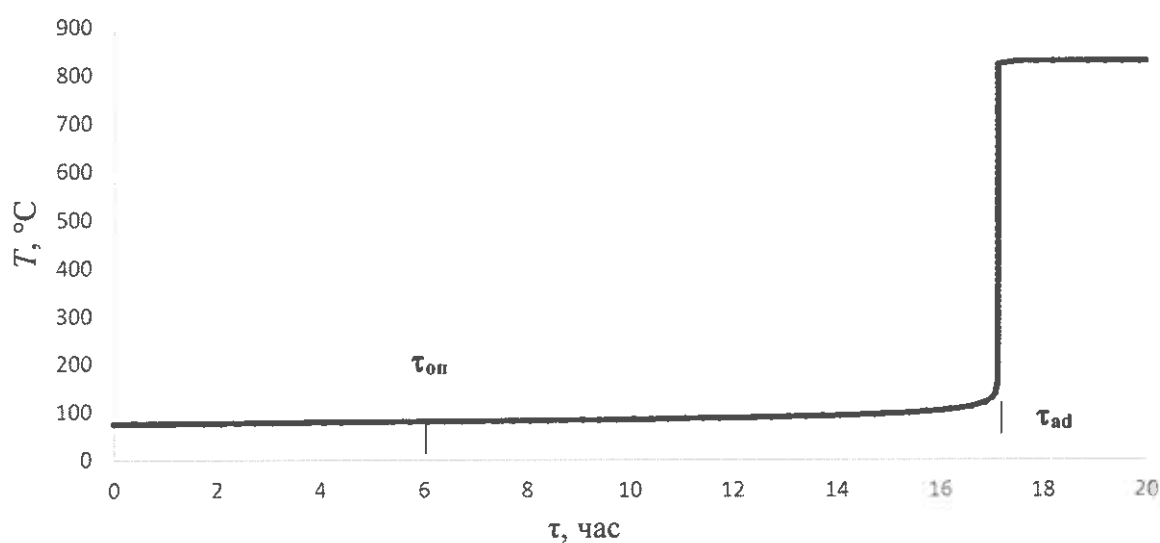


Рис. 1. Изменение температуры веществ во времени в адиабатических условиях

Определенный период индукции адиабатического теплового взрыва равен 17,1 часа. За время операции в 6 часов в адиабатических условиях достигается температура в 79 °С. Пределы безопасной эксплуатации нарушены не будут.

### **Выводы**

Рассмотренный случай единичного отклонения параметра процесса не приводит к существенному снижению безопасности, пределы безопасной эксплуатации не нарушаются.

---