



УДК: 621.039.58

DOI: 10.26277/SECNRS.2023.110.4.003

© 2023. Все права защищены.

ГРАФИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ОБОСНОВАНИЮ БЕЗОПАСНЫХ ПАРАМЕТРОВ ЯДЕРНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ОБЪЕКТОВ ЯДЕРНОГО ТОПЛИВНОГО ЦИКЛА

Соколов И. П.* , д-р хим. наук (isokolov@secnrs.ru),
Понизов А. В.* , канд. техн. наук (ponizov@secnrs.ru),
Попков В. А.* , канд. техн. наук (popkov@secnrs.ru),
Шарафутдинов Р. Б.* , канд. техн. наук (charafoutdinov@secnrs.ru)

Статья поступила в редакцию 13 ноября 2023 г.

Аннотация

Обоснование ядерной безопасности является приоритетным направлением в обеспечении безопасности объектов ядерного топливного цикла. Для предотвращения возникновения на объектах ядерного топливного цикла самоподдерживающейся цепной реакции разработана специальная система требований по установлению уровней значений параметров ядерной безопасности. Выполнение этих требований связано с анализом совокупности критических зависимостей между параметрами ядерной безопасности.

Цель статьи – представление результатов по использованию графического подхода для обоснования безопасных значений параметров ядерной безопасности применительно к отдельным единицам оборудования, который базируется на построении и анализе совмещенных диаграмм критических зависимостей между параметрами ядерной безопасности.

В результате использования графического подхода приведено графическое обоснование принципа установления одного из безопасных параметров ядерной безопасности для объектов ядерного топливного цикла.

► **Ключевые слова:** *параметры ядерной безопасности, графический подход, диаграммы критических зависимостей, объекты ядерного топливного цикла.*

* Федеральное бюджетное учреждение «Научно-технический центр по ядерной и радиационной безопасности», Москва, Россия.

GRAPHIC APPROACH TO JUSTIFICATION OF SAFE NUCLEAR SAFETY PARAMETERS FOR NUCLEAR FUEL CYCLE FACILITIES

Sokolov I. P.*; D. Sc.,
Ponizov A. V.*; Ph. D.,
Popkov V. A.*; Ph. D.,
Sharafutdinov R. B.*; Ph. D.

Article is received on November 13, 2023.

Abstract

The justification of nuclear safety is a priority direction in ensuring safety for nuclear fuel cycle facilities. A special system of requirements for determination of levels of values of nuclear safety parameters is used to prevent the occurrence of a self-sustaining chain reaction at nuclear fuel cycle facilities. The fulfilment of these requirements is associated with the analysis of the aggregate of critical dependencies among nuclear safety parameters.

The purpose of the Article is to provide the results of using the graphic approach for justification of safe nuclear safety parameters to be applied to individual pieces of equipment based on the plotting and analysis of combined diagrams of critical dependencies among nuclear safety parameters.

As a result of applying the graphic approach, a graphic justification for the principle of determination of one out of safe nuclear safety parameters was provided to ensure nuclear safety for nuclear fuel cycle facilities.

► **Keywords:** nuclear safety parameters, graphic approach, diagrams of critical dependencies, nuclear fuel cycle facility.

* Scientific and Engineering Centre for Nuclear and Radiation Safety, Moscow, Russia.

Введение

Обеспечение ядерной безопасности является приоритетным направлением в обеспечении безопасности объектов ядерного топливного цикла (ОЯТЦ).

Предотвращению протекания в ядерно-делящихся материалах (веществах) (ЯДМ (В)) под действием нейтронов самоподдерживающейся цепной реакции деления ядер (СЦР), в результате которой практически мгновенно выделяется большое количество энергии в виде вспышки ионизирующего излучения или взрыва, уделяется особое внимание в нормативном обеспечении безопасности ОЯТЦ и при осуществлении их деятельности.

Для предотвращения возникновения неуправляемой СЦР на ОЯТЦ разработана специальная система требований по установлению уровней значений параметров ядерной безопасности, которые изложены в федеральных нормах и правилах [1, 2].

Система требований, изложенных в [2], исходит из определений устанавливаемых уровней значений параметров ядерной безопасности. Эти определения, отражающие сложные типы существующих зависимостей между параметрами ядерной безопасности, сформулированы настолько в общем виде, что возникает потребность в их более ясной трактовке. Этот аспект нашел свое отражение в п. 3.8.2 [2], в соответствии с которым работникам должна быть предоставлена возможность получения разъяснений и дополнительной информации по вопросам ядерной безопасности. С точки зрения формирования культуры безопасности целесообразно, чтобы порядок установления уровней значений параметров ядерной безопасности по критическим зависимостям был удобным для восприятия и применения на практике.

В связи с этим представляют интерес графическое объединение и анализ совокупности взаимосвязанных критических зависимостей между параметрами ядерной безопасности, позволяющие наглядно устанавливать границы областей безопасной эксплуатации ОЯТЦ. Возможности графического подхода для обоснования безопасных условий осуществления ряда технологических процессов ОЯТЦ показаны в [3–6].

Целью статьи было представление результатов по использованию графического подхода для обоснования безопасных значений параметров ядерной безопасности применительно к отдельным единицам оборудования ОЯТЦ.

Схема установления значений параметров ядерной безопасности для отдельных единиц оборудования объектов ядерного топливного цикла

К параметрам ядерной безопасности ОЯТЦ относят [2]:

- параметры для отдельных единиц оборудования (или единиц хранения);
- параметры, характеризующие состав данного ЯДМ (В): содержание поглотителей и замедлителей нейтронов, обогащение урана, нуклидный состав, влажность, гомогенность;
- параметры, характеризующие условия отражения нейтронов в оборудовании и окружении ядерной установки: конструкции оборудования, расстояния между единицами оборудования и др.

Перечень параметров ядерной безопасности для отдельных единиц оборудования ОЯТЦ включает [2]: объем (V), диаметр (D), толщину слоя (T), ограниченного внутренними поверхностями оборудования ядерной установки; массу (M) ЯДМ (В), загружаемую в оборудование ядерной установки или находящуюся в нем, концентрацию (C) ЯДМ (В).

Для параметров ядерной безопасности, относящихся к ЯДМ (В), установлены уровни значений, определения которых даны в [2] и приведены в таблице.

Графическое отображение принципа установления уровней значений параметров ядерной безопасности для отдельных единиц оборудования ОЯТЦ с водными растворами показано в общем виде на примере зависимости критической массы M от концентрации C (для фиксированных значений других ядерных параметров) на рис. 1.

Согласно данным, приведенным в [7], тип зависимости критической массы ЯДМ (В) ($M_{кр}$) от концентрации (атомного соотношения ЯДМ (В)/Р (водород), вычисленной на основе транспортной теории, имеет вид, изображенный на рис. 1 линией 1-2-3-4. Этой линии соответствует эффективный коэффициент размножения нейтронов $K_{эф}$ системы, равный 1. Выше этой линии находится область значений параметров, соответствующая протеканию СЦР.

Рассматриваемая функциональная зависимость характеризуется наличием минимума в точке 2, локального максимума при очень больших концентрациях ЯДМ (В) в точке 3, вертикальной асимптотой при малых концентрациях ЯДМ (В) вблизи точки 1. На участке 1-2 функция является вогнутой убывающей, на участке 2-3 – возрастающей: сначала вогнутой, затем выпуклой; на участке 3-4 – убывающей.

Уровни параметров ядерной безопасности
The levels of nuclear safety parameters

№	Определения
1.	«Критический параметр (критическое значение параметра ядерной безопасности) – ... значение параметра ядерной безопасности, содержащей ЯДМ (В, Н) системы, соответствующее эффективному коэффициенту размножения $K_{эф}$ системы, равному 1»
2.	«Минимальный критический параметр – наименьшее из значений критического параметра рассматриваемой системы во всем диапазоне его изменения»
3.	«Предельное значение параметра (предельный параметр) – значение параметра ядерной безопасности в возможном диапазоне его изменения, при котором (при определенных значениях других параметров ядерной безопасности системы, событиях из числа предусмотренных проектом) коэффициент размножения системы или оборудования достигает наибольшего значения»
4.	«Допустимый параметр (допустимое значение параметра ядерной безопасности): ... – в n раз меньшее соответствующего критического параметра той же системы»
5.	«Безопасный параметр (безопасное значение параметра ядерной безопасности): ... – значение параметра ядерной безопасности рассматриваемой системы, содержащей ЯДМ (В, Н), в n раз меньшее, чем значение соответствующего минимального критического параметра той же системы. Безопасный параметр должен обеспечивать значение $K_{эф}$ системы не более 0,95»
6.	«Пороговое значение параметра ядерной безопасности (пороговое значение параметра, пороговый параметр) – верхний (нижний) предел значения параметра ядерной безопасности, который не должен быть нарушен при нормальной эксплуатации»

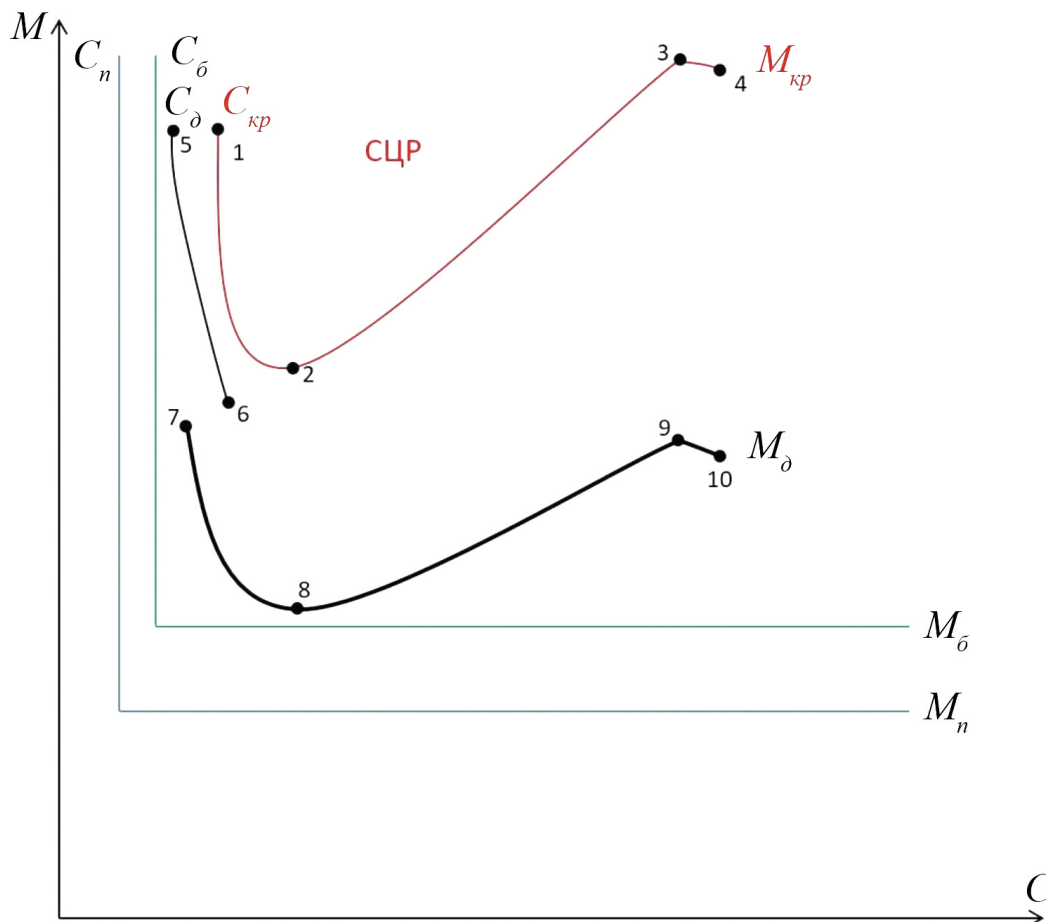


Рис. 1. Диаграмма соответствия уровней значений параметров ядерной безопасности
 [Fig. 1. Diagram of levels to nuclear safety parameters]

Согласно определению, приведенному в таблице, минимальной критической массе будет соответствовать значение, относящееся к точке 2 на анализируемой зависимости, а минимальной (наименьшей) критической концентрации, соответственно, – наименьшее значение концентрации в точке 1.

В [1, 2] приведены требуемые для обеспечения ядерной безопасности устанавливаемые значения коэффициента запаса n (указанного в таблице) по:

- массе не менее 2,1;
- концентрации и объему не менее 1,3;
- диаметру цилиндра и толщине слоя не менее 1,1.

С учетом этого на рис. 1 условно изображены зависимости допустимой массы (M_d) от концентрации (линия 7-8-9-10) и допустимой концентрации (C_d) от массы (линия 5-6), для которых должны выполняться соотношения:

$$M_1/M_7 = M_2/M_8 = M_3/M_9 = M_4/M_{10} > 2,1; \quad (1)$$

$$C_1/C_5 = C_2/C_6 > 1,3. \quad (2)$$

Как следует из рис. 1, использование коэффициентов запаса приводит к сдвигу линии допустимых значений концентрации по оси абсцисс в сторону меньших значений концентрации и сдвигу линии допустимых значений массы по оси ординат в сторону меньших значений массы по отношению к критическим значениям этих ядерных параметров.

Согласно определению, приведенному в таблице, безопасному значению массы (M_0) будет соответствовать положение минимума на зависимости допустимой массы от концентрации в точке 8, а безопасное значение концентрации (C_0) будет соответствовать положению вертикальной асимптоты вблизи точки 5. Непревышение этих значений массы и концентрации ЯДМ (В) должно обеспечивать значение $K_{эф}$ системы не более 0,95.

Так как в [1] приведено, что при нормальной эксплуатации ОЯТЦ коэффициент размножения нейтронов $K_{эф}$ не должен превышать значения 0,95, то можно заключить, что пороговые значения массы (M_n) и концентрации (C_n) ЯДМ (В) могут быть установлены как вблизи их безопасных значений, так и (с дополнительным коэффициентом запаса) при более низких значениях, как это условно показано на рис. 1.

Что касается предельных значений массы и концентрации, для которых (согласно определению, приведенному в таблице) $K_{эф}$ достигает наибольшего значения, то здесь имеется следующее

ограничение. В [1] приведено, что при любом учитываемом в проекте исходном событии $K_{эф}$ не должен превышать 0,98 или коэффициент запаса должен быть не менее 1,05, что должно быть обосновано расчетом либо установлено экспериментально. Таким образом, предельные значения массы и концентрации могут превысить допустимые значения, но не могут достичь критических значений массы и концентрации.

Рассмотренная схема соответствий между значениями устанавливаемых уровней массы (концентрации) применима при соблюдении постоянных значений других параметров ядерной безопасности. При изменении значений этих параметров критическая зависимость (а вместе с ней и допустимые, и безопасные значения) будет изменять свое положение на рассматриваемой диаграмме. Так, в [7] показано, что использование отражателя нейтронов, увеличение толщины отражателя, повышение обогащения урана приводят к снижению значений критической массы (сдвигу зависимости критической массы от концентрации в сторону ее меньших значений).

Аналогичным образом могут быть построены диаграммы соответствий между уровнями значений для любых параметров ядерной безопасности, включая объем (V), диаметр (D), толщину слоя (T).

На основании данной концептуальной схемы графических построений может быть разработана соответствующая методика для реалистичных функциональных зависимостей.

Схема построения недостающих критических зависимостей между параметрами ядерной безопасности

Использование графического подхода позволяет (как это показано в [4, 7]) построить в случае необходимости недостающую критическую зависимость между двумя параметрами ядерной безопасности и оценить по ней возможный запас безопасности. Для этого необходимо знание критических зависимостей каждого из данных параметров с третьим параметром ядерной безопасности.

В качестве примера на рис. 2 в общем виде показано использование графических построений для определения типа зависимости объема V от радиуса (диаметра) R оборудования (форма цилиндра) по приведенному в [7] типу зависимости объема V от концентрации C и приведенному в [9] типу зависимости радиуса цилиндра R от концентрации C .

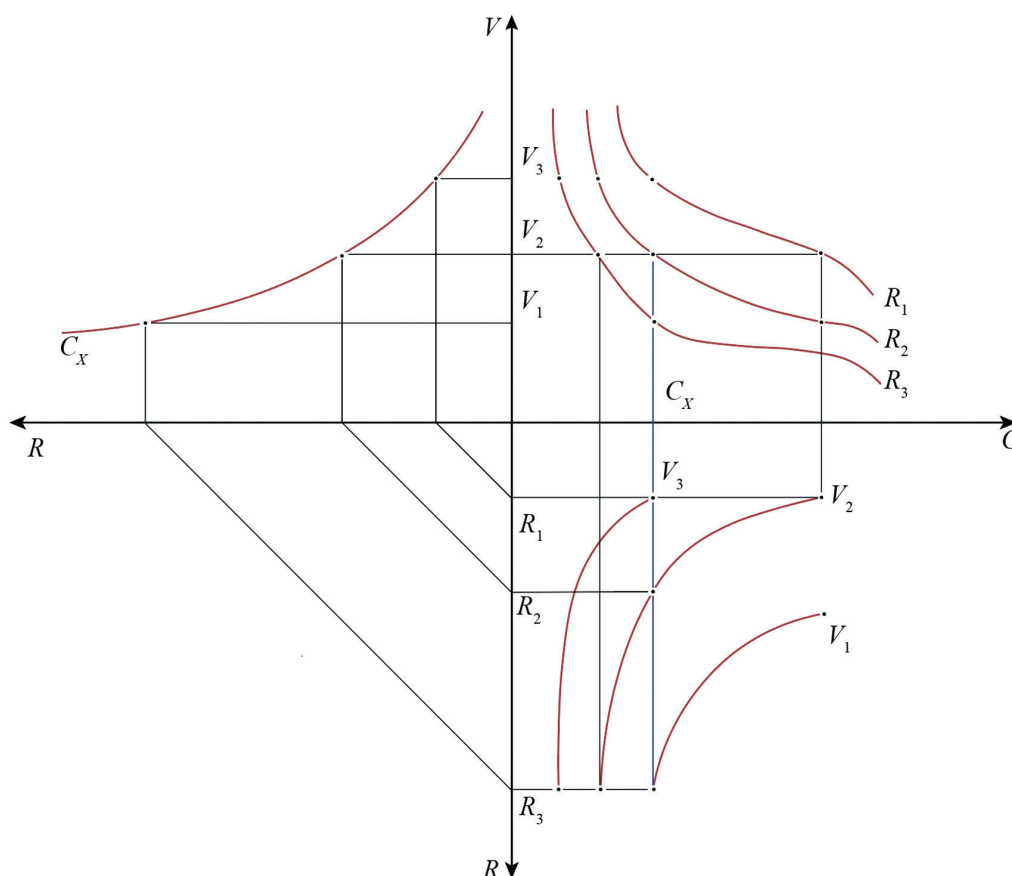


Рис. 2. Схема соответствия между критическими значениями параметров ядерной безопасности [Fig. 2. The correspondence between critical nuclear safety parameters]

Согласно [7] зависимость между V и C характеризуется вертикальной асимптотой при низких значениях концентрации и наименьшим значением V при предельном значении C . Данная функция является убывающей, вогнутой при низких значениях C и выпуклой при ее больших значениях. Согласно [9] зависимость между C и R является близкой к гиперболической и характеризуется наличием двух асимптот при больших значениях каждого из этих параметров.

Для решения поставленной задачи использовали семейство кривых зависимости V от C для различных значений R и семейство кривых зависимости C от R для различных значений V . При этом учитывали, что для обеспечения ядерной безопасности с увеличением R (в направлении от R_1 до R_3) объем раствора должен снижаться, а увеличение V (в направлении от V_1 до V_3) должно приводить к снижению значения R . Поскольку значения параметров V , C , R должны быть согласованы между собой, на рис. 2 с помощью графических построений показан пример соответствия сечения V_2 на верхнем правом графике кривой V_2 на нижнем графике.

Тип зависимости между V и R приведен на рис. 2 применительно к промежуточной концентрации C_x . Точки пересечения значения C_x с кривыми зави-

симости C от R определяют значения R , соответствующие значениям V . Таким образом, с помощью приведенных графических построений была получена искомая зависимость между значениями V и R применительно к используемому значению концентрации C_x . Можно отметить, что полученная зависимость относится к гиперболическому типу. Аналогичным образом можно определить семейство зависимостей V от R для других значений C .

Приведенная схема графических построений может быть также использована для определения других недостающих зависимостей между параметрами ядерной безопасности, что может быть востребовано при проведении комплексного анализа ядерной безопасности.

Графическое представление принципа достаточности обеспечения ядерной безопасности объектов ядерного топливного цикла по одному параметру ядерной безопасности

В п. 2.7 [2] приведено, что для обеспечения ядерной безопасности достаточно установить один из безопасных параметров для отдельных единиц оборудования или единиц хранения.

Это означает, что при непревышении безопасного значения одного параметра ядерной безопасности не будут превышены безопасные значения остальных параметров ядерной безопасности, относящихся к данному оборудованию.

Следовательно, безопасные значения параметров ядерной безопасности устанавливают таким образом, чтобы с гарантированным запасом исключить возможность возникновения СЦР во всех диапазонах варьирования значений любых параметров ядерной безопасности.

Анализ рис. 1 показывает, что система установления безопасных значений параметров ядерной безопасности базируется на установлении минимальных (наименьших) критических параметров ядерной безопасности и снижении этих минимальных значений с использованием установленных значений коэффициентов запаса. В результате создается дополнительный запас безопасности для всех значений параметров, отличных от значений, относящихся к минимальным (наименьшим) критическим значениям.

В [8] приведено, что критическими параметрами цепной ядерной реакции для ^{235}U ($\approx 90\%$ обогащения) являются: критическая масса, равная 800 г, критический объем 6,3 л, критическая концентрация 11,6 г/л.

Определение критических значений параметров ядерной безопасности в предположении, что

представленная в [8] информация относится к одной системе, будет неправомерным, что видно из следующих расчетов.

Принцип достаточности обеспечения ядерной безопасности технологических производств переработки радиоактивных материалов может быть обеспечен, если один из параметров, характеризующих систему, будет ниже критического значения, представленного в [8].

В систему ядерных параметров для отдельной единицы оборудования входят четыре составляющих: масса – объем – концентрация – диаметр или в качестве варианта: масса – объем – концентрация – высота слоя, так как высота слоя не зависит от диаметра.

Количество всех возможных критических зависимостей для каждого двух параметров в таком случае равно:

$$C_4^2 = 4 \times 3 / 2 \times 1 = 6. \quad (3)$$

Используя типы критических зависимостей между M и C ; V и C ; R и C , приведенные в [7], и полученные с их помощью графические построения типов зависимостей между M и R ; M и V ; V и R , была построена общая диаграмма взаимосвязанных по значениям шести бинарных диаграмм параметров ядерной безопасности, которая приведена на рис. 3.

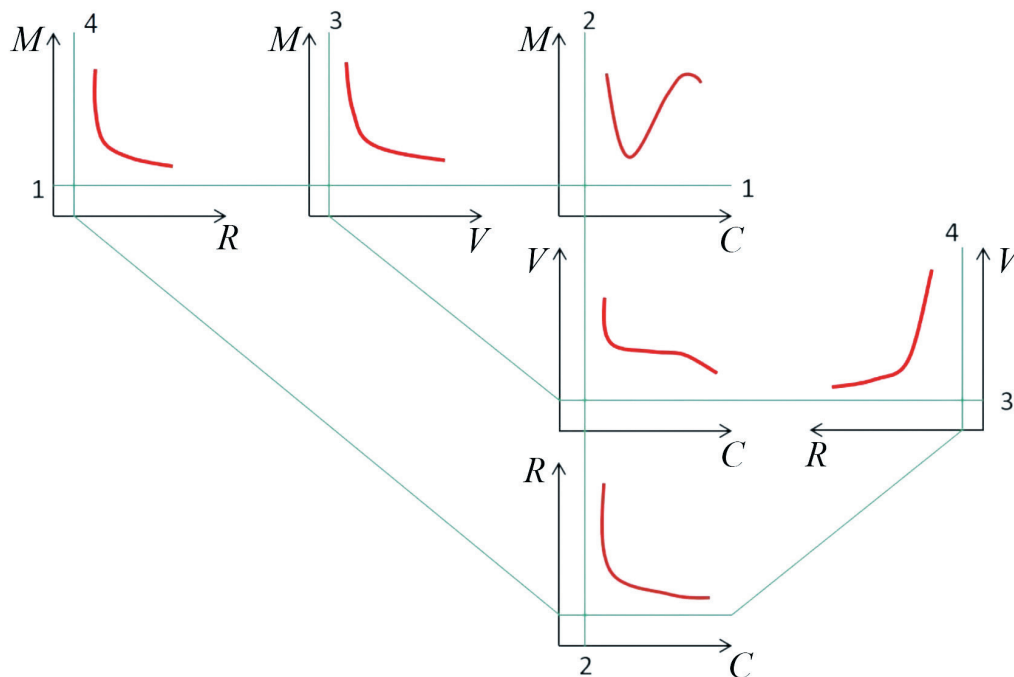


Рис. 3. Система бинарных диаграмм критических и безопасных значений параметров ядерной безопасности [Fig. 3. Binary diagrams system for critical and safe nuclear safety parameters]

На бинарных диаграммах рис. 3 изображены типы критических зависимостей между параметрами ядерной безопасности в одинаковых диапазонах изменения значений каждого из них.

Прямая линия 1-1 на рис. 3 соответствует значению установленной безопасной массы; прямая линия 2-2 – значению установленной безопасной концентрации; ломаная линия 3-3 – значению безопасного объема; ломаная линия 4-4 – значению безопасного радиуса (диаметра).

Из рис. 3 следует, что во всех случаях установленные безопасные значения параметров не будут пересекаться ни с одной критической зависимостью, что обеспечивает исключение возникновения СЦР при соблюдении этих безопасных значений ядерных параметров.

Приведенная на рис. 3 диаграмма соответствия между критическими и безопасными значениями

параметров ядерной безопасности позволяет наглядно представить содержание принципа достаточности использования безопасного значения любого одного параметра ядерной безопасности для обеспечения ядерной безопасности отдельных единиц оборудования или единиц хранения ОЯТЦ.

Выводы

1. Предложен графический подход к обоснованию разрабатываемых методик по определению безопасных параметров ядерной безопасности ОЯТЦ на основе построения диаграмм соответствия уровней значений параметров ядерной безопасности.

2. Показан графический подход для обоснования принципа достаточности установления и соблюдения одного безопасного параметра ядерной безопасности для обеспечения ядерной безопасности ОЯТЦ.

Литература

1. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии. Общие положения обеспечения безопасности объектов ядерного топливного цикла (ОПБ ОЯТЦ). НП-016-05: утв. приказом Ростехнадзора от 28.07.2014 № 326 (с изм.).
2. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии. Правила ядерной безопасности для объектов ядерного топливного цикла. НП-063-05: утв. приказом Ростехнадзора от 02.01.2005 № 15.
3. Соколов И. П. Физико-химические условия самовоспламенения пирофорных материалов // Ядерная и радиационная безопасность. 2016. № 1 (79). С. 33–37.
4. Соколов И. П., Шарафутдинов Р. Б. Физико-химический анализ условий самовоспламенения пирофорных материалов, применяемых на ОЯТЦ // Ядерная и радиационная безопасность. 2018. № 2 (88). С. 3–10.
5. Соколов И. П., Понизов А. В., Шарафутдинов Р. Б. Анализ влияния масштабного фактора на взрывоопасность технологических процессов объектов ядерного топливного цикла // Ядерная и радиационная безопасность. 2020. № 3 (97). С. 15–22. DOI: 10.26277/SECNRS.2020.97.3.002.
6. Соколов И. П., Понизов А. В., Шарафутдинов Р. Б. Графический подход к обоснованию безопасности процесса остекловывания высокоактивных отходов в индукционных печах с водоохлаждаемыми тиглями // Ядерная и радиационная безопасность. 2021. № 2. С. 29–39. DOI: 10.26277/SECNRS.2021.100.2.003.
7. Круглов А. К. К истории ядерной и радиационной безопасности // Бюллетень центра общественной информации по атомной энергии. 1994. № 3/94. С. 33–43.
8. Громов Б. В., Савельева В. И., Шевченко В. Б. Химическая технология облученного ядерного топлива. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – С. 325.
9. Левин В. Е. Ядерная физика и ядерные реакторы. – М.: Атомиздат, 1966. – С. 229.

References

1. Federal'nye normy i pravila v oblasti ispol'zovaniya atomnoi energii "Obshchie polozheniya obespecheniya bezopasnosti ob"ektov yadernogo toplivnogo tsikla (OPB OYATTS)" (NP-016-05) [Federal rules and regulations in the field of atomic energy use "Common conditions of safety guarantee to fuel cycle facilities" (NP-016-05)]. 2014.

2. Federal'nye normy i pravila v oblasti ispol'zovaniya atomnoi energii "Pravila yadernoi bezopasnosti dlya ob"ektov yadernogo toplivnogo tsikla" (NP-063-05) [Federal rules and regulations in the field of atomic energy use "Nuclear safety regulations for fuel cycle facilities" (NP-063-05)]. 2005.
3. Sokolov I. P. (2016). Fiziko-khimicheskie usloviya samovosplamneniya pirofornykh materialov [Physico-chemical conditions of pyrophoric materials auto-ignition]. *Yadernaya i radiatsionnaya bezopasnost' – Nuclear and Radiation Safety Journal*, No. 1 (79), pp. 33–37. [in Russian].
4. Sokolov I. P., Sharafutdinov R. B. (2018). Fiziko-khimicheskii analiz uslovii samovosplamneniya pirofornykh materialov, primenyaemykh na OYATTS [Physical-chemical analysis of auto-ignition conditions for pyrophoric materials in fuel cycle facilities]. *Yadernaya i radiatsionnaya bezopasnost' – Nuclear and Radiation Safety Journal*, No. 2 (88), pp. 3–10. [in Russian].
5. Sokolov I. P., Ponizov A. V., Sharafutdinov R. B. (2020). Analiz vliyaniya masshtabnogo faktora na vzryvoopasnost' tekhnologicheskikh protsessov ob"ektov yadernogo toplivnogo tsikla [The analysis of chemical-technological processes scale factor for fuel cycle facilities explosion indexes]. *Yadernaya i radiatsionnaya bezopasnost' – Nuclear and Radiation Safety Journal*, No. 3 (97), pp. 15–22. [in Russian]. DOI: 10.26277/SECNRS.2020.97.3.002.
6. Sokolov I. P., Ponizov A. V., Sharafutdinov R. B. (2021). Graficheskii podkhod k obosnovaniyu bezopasnosti protsessa osteklovyvaniya vysokoaktivnykh otkhodov v induktsionnykh pechakh s vodookhlazhdaemyimi tiglyami [The graphic approach to justification of high-level waste vitrification in cold crucible induction melter]. *Yadernaya i radiatsionnaya bezopasnost' – Nuclear and Radiation Safety Journal*, No. 2 (100), pp. 29–39. [in Russian]. DOI: 10.26277/SECNRS.2021.100.2.003.
7. Kruglov A. K. (1994). K istorii yadernoi i radiatsionnoi bezopasnosti [On the history of nuclear and radiation safety]. *Bulleten' tsentra obshestvennoi informatsii po atomnoi energii – Bulletin of the Center for Public Information on Atomic Energy*, No. 3/94, pp. 33–43. [in Russian].
8. Gromov B. V., Savel'eva V. I., Shevchenko V. B. (1983). Khimicheskaya tekhnologiya obluchennogo yadernogo topliva [Chemical technology of irradiated nuclear fuel]. Moscow: Energoatomisdat. [in Russian].
9. Levin V. E. (1966). *Yadernaya fizika i yadernye reaktory* [Nuclear physics and nuclear reactors]. Moscow: Atomisdat. [in Russian].

Сведения об авторах

Соколов Иван Павлович, главный научный сотрудник отдела безопасности предприятий топливного цикла, федеральное бюджетное учреждение «Научно-технический центр по ядерной и радиационной безопасности» (107140, Москва, ул. Малая Красносельская, д. 2/8, корп. 5).

Понизов Антон Владимирович, начальник отдела безопасности предприятий топливного цикла, федеральное бюджетное учреждение «Научно-технический центр по ядерной и радиационной безопасности» (107140, Москва, ул. Малая Красносельская, д. 2/8, корп. 5).

Попков Владислав Александрович, ведущий научный сотрудник отдела безопасности предприятий топливного цикла, федеральное бюджетное учреждение «Научно-технический центр по ядерной и радиационной безопасности» (107140, Москва, ул. Малая Красносельская, д. 2/8, корп. 5).

Шарафутдинов Рашиет Борисович, заместитель директора, федеральное бюджетное учреждение «Научно-технический центр по ядерной и радиационной безопасности» (107140, Москва, ул. Малая Красносельская, д. 2/8, корп. 5).

Authors credentials

Sokolov Ivan Pavlovich, Chief Researcher of Division for Safety of Fuel Cycle Facilities, Scientific and Engineering Centre for Nuclear and Radiation Safety (2/8, bld. 5, Malaya Krasnoselskaya str., Moscow, 107140), e-mail: isokolov@secnrs.ru.

Ponizov Anton Vladimirovich, Head of Division for Safety of Fuel Cycle Facilities, Scientific and Engineering Centre for Nuclear and Radiation Safety (2/8, bld. 5, Malaya Krasnoselskaya str., Moscow, 107140), e-mail: ponizov@secnrs.ru.

Popkov Vladislav Aleksandrovich, Leading Researcher of Division for Safety of Fuel Cycle Facilities, Scientific and Engineering Centre for Nuclear and Radiation Safety (2/8, bld. 5, Malaya Krasnoselskaya str., Moscow, 107140), e-mail: popkov@secnrs.ru.

Sharafutdinov Rashet Borisovich, Deputy Director, Scientific and Engineering Centre for Nuclear and Radiation Safety (2/8, bld. 5, Malaya Krasnoselskaya str., Moscow, 107140), e-mail: charafoutdinov@secnrs.ru.

Для цитирования

Соколов И. П., Понизов А. В., Попков В. А., Шарафутдинов Р. Б. Графический подход к обоснованию безопасных параметров ядерной безопасности объектов ядерного топливного цикла // Ядерная и радиационная безопасность. 2023. № 4 (110). С. 37–46. DOI: 10.26277/SECNRS.2023.110.4.003.

For citation

Sokolov I. P., Ponizov A. V., Popkov V. A., Sharafutdinov R. B. Graphic approach to justification of safe nuclear safety parameters for nuclear fuel cycle facilities. Nuclear and Radiation Safety Journal, 2023, No. 4 (110), pp. 37–46. [in Russian]. DOI: 10.26277/SECNRS.2023.110.4.003.

