

УДК: 621.039.68

DOI: 10.26277/SECNRS.2023.109.3.002

© 2023. Все права защищены.

ВОЗМОЖНЫЕ КРИТЕРИИ ДЛЯ ОТНЕСЕНИЯ УСТАНОВОК УПРАВЛЯЕМОГО ТЕРМОЯДЕРНОГО СИНТЕЗА К ОБЪЕКТАМ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ

Киркин А. М.* (kirkin@secnrs.ru),
Курындин А. В.*, канд. техн. наук (kuryndin@secnrs.ru),
Приходько А. В.** (pav@ibrae.ac.ru),
Симонова А. В.*, канд. техн. наук (simonova@secnrs.ru),
Синегрибов С. В.* (sinegribov@secnrs.ru),
Смирнов А. О.* (asmirnov@secnrs.ru),
Шпиньков В. И.** (shvi@ibrae.ac.ru)

Статья поступила в редакцию 22 августа 2023 г.

Аннотация

В 2022 г. Комитетом по энергетике Государственной Думы Федерального собрания Российской Федерации отмечалось, что для повышения уровня безопасности инновационных термоядерных технологий требуется опережающее развитие нормативной правовой базы в области использования атомной энергии.

В соответствии с положениями статьи 24 Федерального закона от 21.11.1995 № 170-ФЗ «Об использовании атомной энергии» меры по регулированию безопасности объектов использования атомной энергии должны быть соразмерны потенциальной опасности данных объектов. При этом существующие и перспективные установки управляемого термоядерного синтеза обладают степенью потенциальной опасности и техническими особенностями, схожими как с радиационными источниками, так и с ядерными установками. Построение эффективной системы регулирования и обеспечения безопасности может быть реализовано за счет отнесения установок управляемого термоядерного синтеза к различным категориям объектов использования атомной энергии, что, в свою очередь, требует разработки соответствующих критериев.

В статье описан подход к выбору параметров, по которым в будущем в федеральных нормах и правилах в области использования атомной энергии могут быть определены критерии отнесения установок, реализующих реакции термоядерного синтеза легких ядер, к категориям объектов использования атомной энергии.

► **Ключевые слова:** термоядерный синтез, установка управляемого термоядерного синтеза, термоядерная установка, термоядерный реактор, численные критерии, интенсивность, регулирование безопасности, использование атомной энергии.

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

** Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем безопасного развития атомной энергетики Российской академии наук (ИБРАЭ РАН), Москва, Россия.

POSSIBLE CRITERIA FOR FUSION FACILITIES CLASSIFICATION AS NUCLEAR FACILITIES

Kirkin A. M.*,
Kuryndin A. V.*, Ph. D.,
Prihodko A. V.**,
Simonova A. V.*, Ph. D.,
Sinegribov S. V.*,
Smirnov A. O.*,
Shpinkov V. I.**

Article is received on August 22, 2023.

Abstract

In 2022 the Energy Committee of the State Duma of the Federal Assembly of the Russian Federation noted that in order to increase the safety level of innovative fusion technologies, the regulatory framework in the field of the use of atomic energy shall be developed in advance.

In accordance with the provisions of article 24 of Federal Law No. 170-FZ of 21.11.1995 “On the atomic energy use”, measures of nuclear facilities safety regulation must be proportionate to the potential hazard of these facilities. At the same time existing and prospective controlled thermonuclear fusion facilities possess a degree of potential hazard and technical features similar to both radiation sources and nuclear installations. The development of an effective safety regulation system can be implemented by classifying controlled thermonuclear fusion facilities as different types of nuclear facilities, which, in turn, requires the development of appropriate criteria.

The article describes an approach to the choice of parameters, which can be used in federal rules and regulations in the field of the use of atomic energy to establish criteria for classification of installations that implement thermonuclear fusion reactions of light nuclei as nuclear facilities.

► **Keywords:** *thermonuclear reaction, controlled thermonuclear fusion facility, fusion facility, fusion reactor, numerical criteria, intensity, safety regulation, field of atomic energy use.*

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

** Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences (IBRAE RAN), Moscow, Russia.

Введение

В настоящее время в Российской Федерации уже существует или еще проектируется ряд объектов, предназначенных для проведения исследований реакций термоядерного синтеза [1–5] и обладающих всеми признаками и факторами опасности, характерными для объектов использования атомной энергии (ОИАЭ), включая ионизирующее излучение, активацию конструкционных элементов, образование радиоактивных отходов, возможный выброс радиоактивных веществ в атмосферу при авариях. Согласно Отчету Комитета Государственной Думы по энергетике за 2022 год [6] для исключения возможного влияния негативных факторов и повышения уровня безопасности термоядерных технологий необходимо опережающее развитие нормативной правовой базы в области использования атомной энергии.

Следует отметить, что опасность установок управляемого термоядерного синтеза (УТС) имеет значительный разброс, что приводит к необходимости категорирования установок УТС с целью эффективного регулирования и обеспечения безопасности таких установок. Под опасностью в рамках настоящей статьи понимается весь спектр свойств установки, которые могут так или иначе нанести вред персоналу, населению и окружающей среде. Основной составляющей опасности установок УТС является потенциальная радиационная опасность, определяющаяся в соответствии с положениями ОСПОРБ-99/2010 [7].

При этом проблема выбора категории ОИАЭ из перечисленных в статье 3 Федерального закона «Об использовании атомной энергии» № 170-ФЗ [8], к которым относятся установки УТС, актуальна не только в Российской Федерации, но и для мирового сообщества. Так, например, международный исследовательский термоядерный экспериментальный реактор (ИТЭР) признан регулирующим органом Франции (Управлением по ядерной безопасности, ASN) «базовой ядерной установкой», и в отношении него применяются те же нормативные документы, что и для французских атомных станций и исследовательских реакторов. Отнесение ИТЭР к ядерным установкам (ЯУ) также зафиксировано в статье 14 международного соглашения ИТЭР 2006 г. [9, 10]. Одновременно необходимо учитывать, что под «базовой ядерной установкой» во французском законодательстве может пониматься любой объект, содержащий радиоактивные вещества в значительных количествах (выше определенного порогового значения).

В других странах установки УТС могут также классифицироваться как радиационные объекты или радиационные источники (РИ). В качестве примера можно привести токамак JET (Joint European Torus), который отнесен к категории «радиационный объект», а регулирование безопасности деятельности в отношении данного токамака осуществляется Комитетом по вопросам здравоохранения и безопасности (UK Health and Safety Executive) и Управлением по охране окружающей среды Великобритании (UK Environment Agency).

Однако в настоящее время универсальный подход к категорированию установок УТС на международном уровне не определен. Неоднократно данная проблема обсуждалась на различных мероприятиях МАГАТЭ, посвященных вопросам обеспечения и регулирования безопасности установок УТС [11], в том числе в рамках международного проекта по инновационным ядерным реакторам и топливным циклам по теме «Правовые и организационные вопросы перспективного развертывания термоядерных установок» (International Project on Innovative Nuclear Reactors and Fuel Cycles “Legal and Institutional Issues of Prospective Deployment of Fusion Facilities”), а также в рамках консультативного совещания МАГАТЭ по разработке инфраструктуры для обеспечения и регулирования безопасности при проектировании термоядерных установок (Consultancy Meeting on Proposals for Fusion Design Safety and Regulation IAEA Framework Development), проходившего в период с 11 по 14 октября 2021 г. в г. Вене, Австрия. На совещаниях МАГАТЭ также отмечена необходимость разработки специального подхода к категорированию установок УТС, в связи с чем разрабатывается документ МАГАТЭ серии TECDOC, в котором планируется отразить позицию каждого государства-члена МАГАТЭ в отношении подходов к регулированию безопасности действующих, строящихся и проектируемых в стране установок УТС.

Как и во многих странах, в действующем российском законодательстве установки УТС не определены как самостоятельный тип ОИАЭ, а также отсутствует специализированная нормативная правовая база для регулирования их безопасности. Для своевременного создания нормативной правовой основы безопасности установок УТС [12] в 2021 г. инициирована разработка законопроекта о внесении изменений в Федеральный закон № 170-ФЗ [8]. В рамках Федерального проекта «Разработка технологий управляемого термоядерного синтеза и инновационных плазменных технологий» Комплексной программы [1] параллельно с развитием иннова-

ционных технологий проводятся исследования, направленные на развитие нормативной правовой базы регулирования безопасности установок УТС.

Возможные варианты внесения изменений неоднократно обсуждались в период с ноября 2021 по февраль 2022 гг., в том числе на заседаниях научно-технических советов Госкорпорации «Росатом» и Ростехнадзора, а также в рамках специализированной межведомственной рабочей группы по разработке законопроекта. По результатам обсуждений принято согласованное решение о необходимости внесения изменений только в статью 3 Федерального закона № 170-ФЗ [8], определяющих возможность отнесения установок УТС либо к ЯУ, либо к РИ в зависимости от характеристик и параметров установок УТС.

Установление критериев, зависящих от характеристик и параметров установок УТС, также необходимо для точного определения объектов, в отношении которых применяется законодательство в области использования атомной энергии. Так, согласно части 4 статьи 3 Федерального закона № 170-ФЗ [8], действие указанного федерального закона не распространяется на объекты, содержащие или использующие ядерные материалы и радиоактивные вещества в количествах и с активностью (и (или) испускающие ионизирующее излучение с интенсивностью или энергией) менее установленных федеральными нормами и правилами в области использования атомной энергии (ФНП) значений. Иными словами, критерии отнесения объектов к ОИАЭ по количеству/активности радиоактивных материалов или интенсивности/энергии ионизирующего излучения устанавливаются в ФНП.

Установление только критерия по реализации реакции синтеза может привести к избыточным требованиям к целому ряду установок с незначительной или низкой степенью опасности и препятствовать скорому созданию и внедрению новых перспективных технологий УТС. Так, например, в промышленности активно эксплуатируются скважинные генераторы нейтронов, которые реализуют реакцию синтеза за счет использования ускорителей ядер D с мишенями из D или T. Скважинные генераторы нейтронов предназначены для использования в качестве источника нейтронов в составе аппаратных комплексов для геофизических исследований (каротаж). Потенциальное воздействие таких установок на людей значительно ниже по сравнению с будущими термоядерными электростанциями или их прототипами. Такие установки в настоящее

время отнесены к классу источников ионизирующего излучения (генерирующих), которые регулируются в рамках законодательства в области радиационной безопасности и санитарно-эпидемиологического благополучия населения [13, 14].

Таким образом, сама по себе реализация реакции термоядерного синтеза не может быть достаточным критерием для категоризации установок УТС, а одним из первоочередных шагов на пути создания нормативной правовой базы является разработка ФНП, определяющих критерии отнесения установок УТС к ОИАЭ и их категоризации.

Критерии отнесения установок управляемого термоядерного синтеза к категориям объектов использования атомной энергии

Отнесение установок УТС к ОИАЭ, в том числе к ЯУ и РИ, по мнению авторов, должно выполняться с учетом конкретных и легкоопределяемых (проверяемых) численных критериев. Такие критерии позволят сформировать спектр установок, обладающих схожими особенностями, для которых в дальнейшем могут быть разработаны специальные требования по обеспечению безопасности в ФНП и (или) рекомендации в руководствах по безопасности при использовании атомной энергии. Это позволит учесть основные специфические особенности установок УТС и поможет проектным организациям разработать технические и организационные меры, адекватные опасности.

Для возможности применения дифференцированного подхода к установлению обязательных требований параметры, по которым определены критерии отнесения установок УТС к категориям ОИАЭ, должны отражать степень опасности установок. Кроме того, представляется необходимым обеспечение возможности контроля данных параметров (соблюдения критериев) на всех этапах жизненного цикла установок УТС. При этом параметры, по которым установлены критерии, могут быть неизменяемыми на протяжении всего срока службы или измеряться с использованием прямых или косвенных измерений (контролируются и фиксируются в процессе эксплуатации).

Дополнительно параметр или параметры, по которым установлены критерии, по возможности, должны являться нейтральными к технологиям, в том числе учитывать различные методы удержания плазмы, использование ядерных материалов и реализацию разных реакций термоядерного синтеза.

Далее рассмотрены параметры, по которым потенциально могут быть установлены такие критерии, включая назначение, величину максимального аварийного выброса, особенности проекта (метод удержания плазмы), тип реакции, наличие ядерных материалов, наличие специальных неядерных материалов, мощность, а также интенсивность термоядерного источника ионизирующего излучения.

Категорирование установок управляемого термоядерного синтеза по назначению

По назначению установки УТС можно отнести к следующим категориям:

- экспериментальные – предназначены для отработки перспективных технологий и будущих инженерных решений, а также для обоснования безопасности будущих установок;
- исследовательские – предназначены для проведения материаловедческих исследований или изучения методов удержания плазмы;
- энергетические – предназначены для преобразования энергии реакции термоядерного синтеза в тепловую или электроэнергию для нужд конечного потребителя;
- промышленные – предназначены для утилизации долгоживущих радиоактивных отходов, а также наработки ядерных делящихся материалов и радиоизотопной продукции;
- многоцелевые – предназначены для решения всех или нескольких перечисленных выше задач.

В настоящее время на действующих установках проводятся в основном исследовательская деятельность и отработка технологий будущих «больших» установок УТС. В дальнейшем планируется наращивание объемов исследований и изменение проектных характеристик, что приведет к увеличению количества радиоактивных материалов и (или) интенсивности ионизирующего излучения, генерируемого установками, при сохранении исследовательских функций.

Такое категорирование не характеризует степень опасности объекта и может изменяться при эксплуатации. Таким образом, категоризация установок УТС как ЯУ и РИ по функциональному назначению представляется нецелесообразной.

Категорирование установок управляемого термоядерного синтеза по типу реализуемой реакции и методу удержания плазмы

Основой данного метода категоризации является учет всех возможных проектов установок УТС, используемых технологий и типов термоядерных реакций. Проект установки, в том числе метод удержания плазмы, и тип реализуемой реакции не являются ограничениями, но могут быть зафиксированы в паспорте установки и будут неизменными в течение срока эксплуатации. Тип реализуемой реакции в целом может контролироваться косвенно, например по видам и энергии образующихся частиц. Фактически в установках УТС зачастую возможна реализация нескольких типов термоядерных реакций (например, с ядрами, образующимися в результате синтеза). В связи с этим осуществление контроля может быть затруднительно.

Тип реализуемой реакции фактически не связан со степенью опасности установки, которая больше зависит от количества протекающих реакций, чем от их типа. Исключением можно считать установки, которые реализуют безнейтронные реакции и характеризуются более низкой степенью опасности. Однако реализация даже реакций безнейтронного синтеза может приводить к образованию ионизирующего излучения. Так, например, пороговая температура реализации безнейтронной реакции $D-^3He$ ($\sim 8 \cdot 10^9$ K) значительно выше температуры реализации реакции $D-D$ ($\sim 10^9$ K). В результате в процессе нагрева $D-^3He$ плазмы реализуется в первую очередь реакция $D-D$, при которой образуются нейтроны высокой энергии. В результате большие установки УТС безнейтронного синтеза могут быть аналогичны по степени опасности установкам, основанным на других реакциях. В общем случае установки, спроектированные по одному и тому же принципу и использующие одни и те же методы удержания плазмы, могут в значительной степени отличаться масштабами, что непосредственно влияет на их степень опасности. Таким образом, категоризация по данным параметрам не отражает степень опасности установок.

При категорировании установок по типу реализуемой реакции и методу удержания плазмы возможна дифференциация по всему спектру технологий, но отсутствует связь со степенью опасности.

В связи с изложенным выше, категоризация установок УТС по типу реализуемой реакции и методу удержания плазмы также нецелесообразна.

Категорирование установок управляемого термоядерного синтеза по наличию (массе) ядерных материалов

Обращение с ядерными материалами в установке является одним из наиболее важных факторов опасности, свойственным всем ЯУ. В настоящее время в действующих ФНП уже содержатся критерии и ограничения по данному параметру. Такие ограничения, как правило, выбираются исходя из минимального количества ядерных материалов, необходимых для реализации самоподдерживающейся реакции деления (например, не более 300 г по изотопам ^{235}U или ^{239}Pu на площадке [15]).

Наличие ядерных материалов является вполне контролируемым параметром и фиксируется в рамках системы учета и контроля ядерных материалов, а также определяет риск возникновения самоподдерживающейся цепной реакции. Наличие ядерных материалов требует введения специфических требований по ядерной безопасности, при этом для установок УТС меры по обеспечению ядерной безопасности должны быть направлены в первую очередь на надежное обеспечение подкритичности установки, что в целом соответствует основной цели обеспечения ядерной безопасности подкритических ядерных стенов и систем хранения ядерных материалов.

Следует отметить, что ядерные материалы применяются далеко не в каждой установке УТС и такое категорирование не применимо к технологиям, в которых планируется только получение энергии в результате реакций синтеза легких ядер. Таким образом, критерий по наличию ядерных материалов подходит для выделения гибридных термоядерных систем, но не применим для категоризации иных установок УТС.

Категорирование установок управляемого термоядерного синтеза по наличию (массе или активности) трития и иных специальных неядерных материалов

В настоящее время в [16] содержатся критерии по минимальным массам тяжелых нуклидов в веществе, начиная с которых они подлежат учету и контролю в системе государственного учета и контроля ядерных материалов. Следует отметить, что, согласно [16] и [17], учету и контролю в системе государственного учета и контроля ядерных материалов подлежат также специальные неядерные материалы, к которым относятся D, T и ^6Li .

Согласно [16], специальные неядерные материалы относятся к ядерным материалам IV категории. Таким образом, в случае если на установке используется T в количестве 0,2 г и более, то, согласно [16], на такой установке осуществляется использование ядерных материалов и, в соответствии с действующим законодательством, такая установка относится к ЯУ.

По аналогичному принципу (по массе T более 27 г на площадке установки) в настоящее время ИТЭР отнесен к ЯУ в соответствии с законодательством Франции. Следует отметить, что вопрос установления критериев по массе D, T и Li требует проведения дополнительного анализа и проработки возможных вариантов. Установленные в [16] минимальные количества D, T и Li, начиная с которых они подлежат учету и контролю, могут быть использованы в качестве основы для будущих критериев. Такие критерии целесообразно учесть при разработке ФНП, предписывающих выполнение специфических требований по обеспечению безопасности установок УТС (например, в «Общих положениях обеспечения безопасности установок УТС»).

В случае если в веществе не содержится достаточного количества нуклидов ядерных материалов или специальных неядерных материалов, то такие вещества могут подлежать учету и контролю в системе государственного учета и контроля радиоактивных веществ и радиоактивных отходов при условии, что их начальная (паспортная) активность больше критериев, установленных в [18]. Следовательно, если на установке содержатся радиоактивные вещества с активностью, более установленной в [18], то такие установки будут отнесены к РИ в соответствии со статьей 3 Федерального закона № 170-ФЗ [8]. Так, например, если на установке используется тритий-содержащий материал с удельной активностью более $1 \cdot 10^6$ Бк/г и суммарной активностью более $1 \cdot 10^9$ Бк, то такая установка будет относиться к РИ. Кроме того, в [19] установлены основные принципы, критерии и требования обеспечения безопасности на этапах размещения, проектирования (конструирования), сооружения (изготовления), ввода в эксплуатацию, эксплуатации и вывода из эксплуатации РИ.

Содержание специальных неядерных материалов также является параметром, подлежащим постоянному контролю, что реализовано в рамках системы учета и контроля. Так, T имеет период полураспада 12,32 лет и может поступать в организм человека в виде органических соединений и воды, что определяет его высокую опасность с точки зрения радиационного воздействия на человека

в случае его наличия в атмосфере помещений постоянного и временного пребывания персонала и в выбросах при аварии. Кроме того, использование Т в качестве термоядерного топлива ведет к образованию газообразных, жидких и твердых отходов, содержащих как элементарный Т, так и его соединения: оксид трития, органически связанный тритий и тритиды металлов. Однако D и ⁶Li не являются радиоактивными изотопами и их наличие в установке само по себе не является потенциальным фактором опасности. В то же время ряд установок может использовать только D для реализации реакции D-D, в результате которой образуется Т, а также генерируется поток нейтронов с высокой энергией, что, в свою очередь, может приводить к образованию радиоактивных продуктов активации.

Таким образом, наличие (масса/активность) Т и иных специальных неядерных материалов может использоваться для категорирования установок УТС, но при этом требуются дополнительные критерии категоризации установок УТС, в которых Т не используется в качестве топлива.

Категорирование установок управляемого термоядерного синтеза по интенсивности нейтронного потока (пиковой и интегральной)

Сам по себе термин «интенсивность» имеет несколько значений в зависимости от области применения. В рамках настоящей статьи интенсивность

термоядерного источника ионизирующего излучения рассматривается как параметр установки УТС, характеризующийся потоком (числом) частиц, генерируемых в установке в заданный интервал времени. Термин «интенсивность» используется также в части 4 статьи 3 Федерального закона № 170-ФЗ [8] при описании области применения (объектов применения) данного закона.

Интенсивность установок УТС напрямую связана с мощностью (рис. 1), которая используется в международной практике в качестве критерия для применения дифференцированного подхода при регулировании безопасности, например малых модульных реакторов [20]. Так, на рис. 1 представлен график зависимости мощности от потока нейтронов для наиболее распространенных реакций (D-D и D-T). График построен на основании линейной зависимости мощности от потока нейтронов и рассчитан по формуле:

$$W = \frac{n}{p} \cdot J \cdot E,$$

где W – мощность установки УТС (Вт);

n – общее число нейтронов, образующихся в единицу времени в результате реакции термоядерного синтеза (нейтрон/с);

E – средняя энергия, выделяемая в одну реакцию синтеза (МэВ);

p – среднее количество нейтронов на одну реакцию термоядерного синтеза;

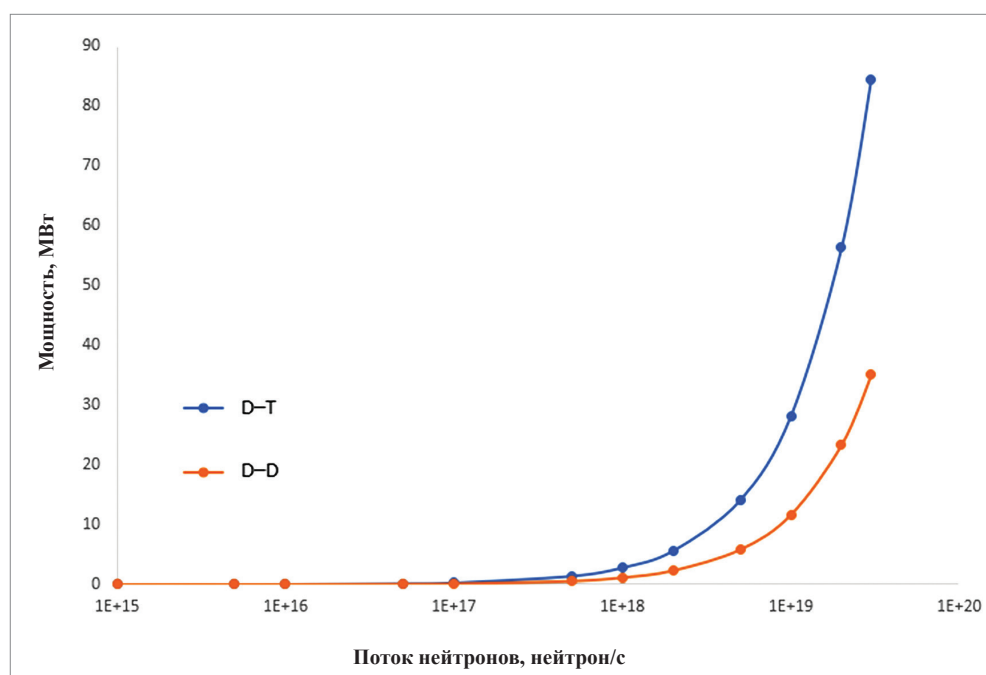


Рис. 1. Зависимость мощности от потока нейтронов при D-T и D-D реакциях [Fig. 1. Power as a function of neutron flux for D-T and D-D reactions]

J – коэффициент перевода из МэВ в Джоуль ($1,602 \cdot 10^{-13}$ Дж/МэВ).

Увеличение интенсивности термоядерного источника ионизирующего излучения приводит к росту мощности, что, в свою очередь, может потребовать введения в проект установки УТС систем отвода тепла. Следует отметить, что необходимость внедрения специальных систем, обеспечивающих отвод тепла, нехарактерна для РИ и реализуется только в ряде наиболее потенциально опасных ЯУ. Так, например, согласно требованиям [21], исследовательские ЯУ с критическими и подкритическими сборками не должны иметь систем отвода тепла, а также ряд исследовательских реакторов может не иметь подобных систем и охлаждаться за счет естественной циркуляции (конвекции) и иных пассивных механизмов передачи тепла.

Пиковая интенсивность, помимо отмеченной выше связи с мощностью, влияет на радиационную безопасность персонала, так как при осуществлении термоядерной реакции происходит генерация ионизирующего излучения с высокой проникающей способностью, в том числе высокоэнергетических нейтронов. Экспериментально установлено, что при облучении значительную роль в накоплении Т в материалах играет не доза, а скорость набора дозы [22], которая определяется пиковой интенсивностью. Критерий по пиковой интенсивности при эксплуатации установок УТС может быть установлен за единицу времени (например, за секунду) для систем с магнитным удержанием плазмы или за один импульс для систем с инерциальным удержанием плазмы.

Интегральная интенсивность является важным фактором с точки зрения потенциала накопления продуктов активации. Специфика некоторых установок УТС (взаимодействие частиц плазмы с поверхностью внутрикорпусных элементов, воздействие высоких температур, большие градиенты температур, сильные магнитные поля и другие) приводит к образованию пыли, содержащей радиоактивные продукты активации или соединения Т, которые попадают в объем установки и в выбросы в атмосферу. Следует также отметить, что длительное воздействие ионизирующего излучения с высокой энергией приводит к значительному ухудшению механических характеристик конструкционных материалов и дополнительному образованию радиоактивной пыли, которая также может попасть в выбросы как при нормальной эксплуатации, так и при нарушениях нормальной эксплуатации, включая аварии.

Использование в проекте установки УТС Ве в качестве покрытия первой стенки приводит к необходимости учета воздействия потока нейтронов на его примеси. Так, согласно [23], удельная активность облученного в ИТЭР Ве при начальной концентрации U в нем 30 мкг/г и флюенсе термоядерных нейтронов на первую стенку $0,3$ МВт/м² сразу после остановки реактора будет составлять ~ 20 ГБк/г в основном за счет изотопа ⁶He [24]. Через сутки удельная активность Ве снизится до ~ 533 МБк/г (97 % за счет Т, 3 % за счет трансураниновых изотопов), а через 100 лет после остановки ИТЭР она составит около 10 МБк/г, из них 82 % – за счет трансураниновых изотопов [24, 25]. Для проекта российского термоядерного реактора «ДЕМО-С» при флюенсе термоядерных нейтронов на первую стенку 10 МВт/м² и прочих равных условиях она составит около 180 кБк/г [26]. Согласно [27], и Ве из ИТЭР, и Ве из «ДЕМО-С» будут отнесены при выводе из эксплуатации к среднеактивным отходам.

С учетом изложенного, пиковая интенсивность может контролироваться при эксплуатации и вносить определяющий вклад в дозовое воздействие на персонал, но при этом она может быть ограничена конструкцией установки УТС. Интегральная интенсивность влияет на процессы деградации материалов основного оборудования и вносит определяющий вклад в накопление радиоактивных продуктов активации, попадающих в выбросы при авариях, и также может контролироваться при эксплуатации установки УТС. Следует также отметить, что категоризация по пиковой и интегральной интенсивности применима к различным технологиям УТС, в том числе не использующим Т.

Таким образом, интенсивность термоядерного источника ионизирующего излучения является измеряемым, контролируемым и достаточно точно отражающим степень опасности установок УТС параметром, а определение критериев по пиковой и интегральной интенсивности в совокупности представляется одним из возможных вариантов. В то же время при установлении окончательных численных значений указанных критериев может быть дополнительно учтена энергия (средняя энергия) испускаемых нейтронов.

Категорирование установок управляемого термоядерного синтеза по величине максимального аварийного выброса

Очевидно, что такая категоризация характеризует степень опасности и при этом используется при дифференциации нормативных требований. Так,

в соответствии с [28], ОИАЭ (от атомных станций до небольших РИ) разделены на четыре категории по степени радиационной опасности.

Однако величина максимального аварийного выброса не может быть объективно измерена ни с использованием прямых, ни косвенных методов, так как она определяется по возможным последствиям запроектной аварии с наиболее тяжелыми радиационными последствиями. То есть величина максимального аварийного выброса оценивается с высокой степенью неопределенности на основании большого количества исследований и опыта эксплуатации установок УТС, учитывается при проектировании и должна уточняться на основании фактических параметров установок УТС после ввода в эксплуатацию. Следует отметить, что так как интегральная интенсивность определяет потенциал накопления продуктов активации, то, таким образом, она влияет на величину выброса.

Кроме того, величина максимального аварийного выброса не может контролироваться в процессе эксплуатации приборами оперативного контроля (постоянного или периодического). Может быть косвенно оценена вероятность максимального аварийного выброса (относительно начального состояния), но для этого необходимо выполнить большое количество измерений характеристик систем и элементов.

Таким образом, величину максимального аварийного выброса также нецелесообразно использовать в качестве основного параметра, по которому определяются критерии категорирования установок УТС.

Подход к категорированию установок управляемого термоядерного синтеза

На основании вышеприведенного анализа, в случае установления критериев по наличию (массе) ядерных материалов, наличию (массе/активности) Т, а также по интенсивности источника нейтронного излучения, категория установок УТС будет определяться по схеме, приведенной на рис. 2. Также на рис. 2 отмечено, в каком случае установки/устройства, реализующие реакцию термоядерного синтеза легких ядер, будут относиться не к ОИАЭ, а к «источникам ионизирующего излучения (генерирующим)». Кроме того, на рис. 2 показано, к каким категориям будут отнесены установки, так или иначе связанные с разработкой технологий УТС (проведение исследований или создание прототипов отдельных частей установок УТС), но не реализующие реакцию синтеза легких ядер.

В случае если на установке, реализующей реакцию термоядерного синтеза, используются ядерные материалы, то такие установки целесообразно

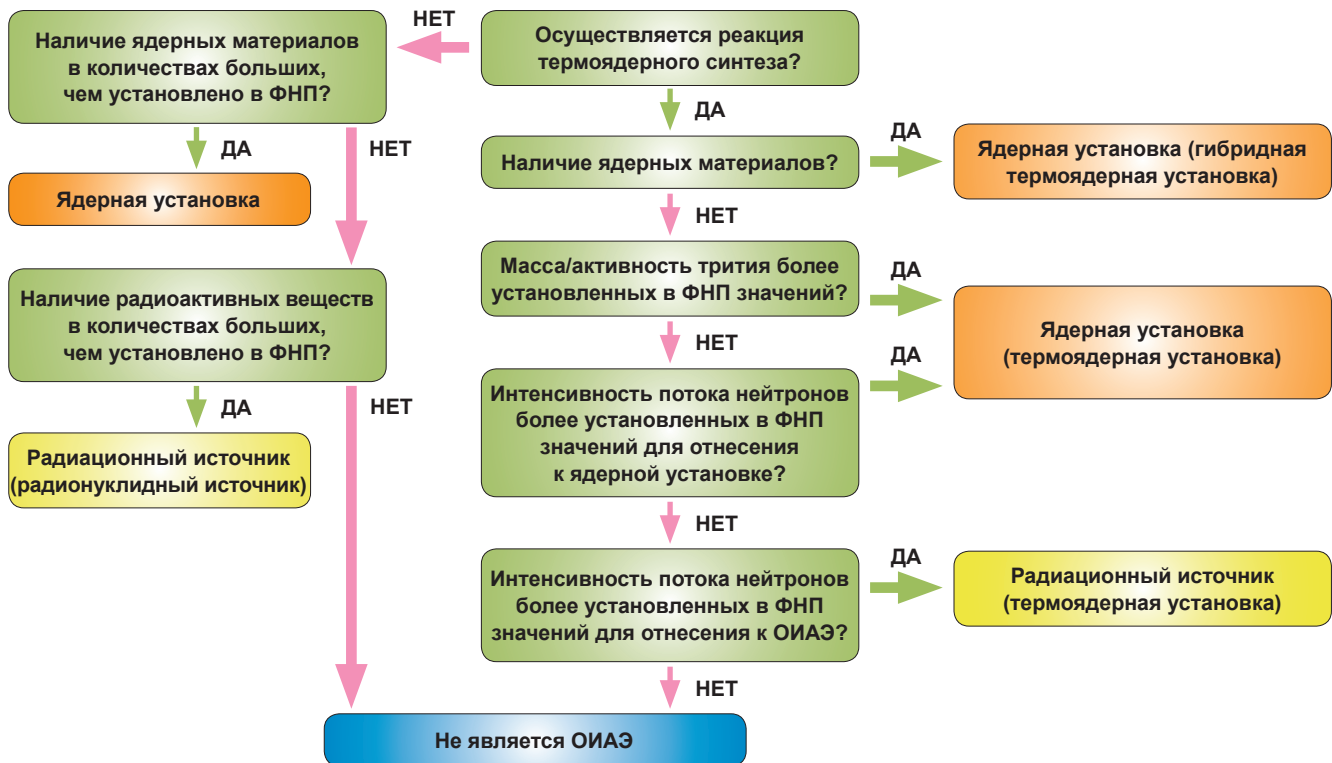


Рис. 2. Предполагаемый подход к категорированию установок управляемого термоядерного синтеза в Российской Федерации

[Fig. 2. Planned approach to classification of controlled thermonuclear fusion facilities in Russian Federation]

относить к особому типу ядерных установок, которые обладают дополнительными рисками с точки зрения ядерной безопасности. Как правило, такие установки называют «гибридные термоядерные установки» или «гибридные системы». В гибридных термоядерных установках источник нейтронов, образующихся в результате реакции синтеза легких ядер, используется для инициации реакции деления (захвата) в бланкетах с ядерными материалами. В частности, предполагается использование термоядерного источника нейтронов, как для наработки ²³⁹Pu в бланкетах из природного или отвалного U, так и для наработки ²³³U в ториевых бланкетах [28, 29]. Также предполагается использование ядерных материалов для выработки дополнительной энергии (мощности) за счет реакции деления и организации контура с турбогенератором для выработки электроэнергии, что может стать одним из этапов создания гибридной термоядерной электростанции.

В случае если на установке УТС используется T или генерируется поток нейтронов более установленных критериев, то такую установку, вне зависимости от времени осуществления реакции, целесообразно относить к категориям «ядерные установки» или «радиационные источники». В рамках настоящей статьи такие «чистые» (без ядерных материалов) установки УТС условно определены как «термоядерные установки» (рис. 2). В таблице приведены возможные численные критерии отнесения термоядерных установок к ЯУ или РИ по интенсивности.

Если при эксплуатации установки не используются ядерные материалы и радиоактивные вещества (в количествах, более установленных в настоящее

время в ФНП), а нейтронные потоки, создаваемые в результате реакции термоядерного синтеза малы (ниже критерия по интенсивности, который будет установлен в будущем при разработке соответствующих ФНП), то такую установку нецелесообразно рассматривать как ОИАЭ.

В ряде установок могут проводиться исследования по удержанию плазмы, при которых не используются радиоактивные изотопы водорода или иные радиоактивные вещества, а также не достигаются температуры реализации реакции синтеза легких ядер. Отнесение подобных установок как к ОИАЭ, так и к источникам ионизирующего излучения (генерирующим) нецелесообразно, а при эксплуатации должны выполняться только требования по охране труда с учетом специфики проводимых работ.

Возможные значения критериев для отнесения установок УТС к типам ОИАЭ с учетом опыта эксплуатации ядерных установок, установок УТС и иных источников ионизирующего излучения приведены в таблице.

Указанные критерии могут быть определены для установок УТС, реализующих реакцию D–T с выходом нейтронов с высокой энергией (~ 14 МэВ). Для установок УТС, реализующих реакции с выходом нейтронов с меньшей энергией (например, реакцию D–D), могут быть установлены иные численные значения указанных критериев.

Приведенные в таблице значения критериев по пиковой и интегральной интенсивности не являются окончательными. Фактически критерии отнесения установок к ОИАЭ (значения интенсивности, ниже которых установка будет относиться к генерирующим источникам ионизирующего

Таблица

Возможные критерии для определения категории установок управляемого термоядерного синтеза
Possible criteria for classification of controlled thermonuclear fusion facilities

Категория установки	Пиковая интенсивность, нейтрон/с	Интегральная интенсивность (за весь период эксплуатации), нейтрон	Условие выполнения
Ядерная установка	$\geq 10^{17}$	$\geq 10^{23}$	Выполняется хотя бы одно условие
Радиационный источник	$\geq 10^9$	$\geq 10^{15}$	Выполняется хотя бы одно условие
Источник ионизирующего излучения (генерирующий)	$\leq 10^9$	$\leq 10^{15}$	Выполняются оба условия одновременно

излучения) установлены на основании информации о существующих скважинных генераторах нейтронов и их паспортных данных. Значения критериев отнесения установок к категории «ядерные установки» определены на основании консервативных оценочных расчетов мощности дозы в примерных местах пребывания персонала и накопления продуктов активации для гипотетической упрощенной модели токамака, реализующего реакцию D–T.

Следует отметить, что имеющаяся в настоящее время информация в открытых источниках не позволяет в полном объеме оценить корректность и обоснованность приведенных в таблице значений, а также указанные значения могут не в полной мере учитывать специфику термоядерных технологий, планируемых к реализации в Российской Федерации. При этом для проработки вопроса применимости и обоснованности предложений по численным значениям указанных критериев и проработки дополнительных критериев отнесения установок УТС к категориям ОИАЭ представляется необходимым учет расчетных и экспериментальных исследований, выполняемых проектными организациями для обоснования безопасности существующих или проектируемых установок УТС. Авторы статьи будут признательны за предоставление любой информации по данному вопросу.

Заключение

В связи с развитием технологий УТС и растущим интересом к установкам УТС в Российской Федерации и в мире очевидна необходимость совершенствования нормативной правовой базы регулирования безопасности в области использования атомной энергии параллельно с развитием инновационных проектов как с целью обеспечения безопасности персонала, населения и окружающей среды, так и с целью планирования деятельности по разработке технологий УТС и проведению экспериментальных исследований по обоснованию их безопасности.

Установленные правила и численные критерии для однозначного отнесения установок УТС к различным категориям ОИАЭ являются основой для создания эффективной системы регулирования и обеспечения безопасности. В рамках настоящей статьи продемонстрировано, что в качестве параметров, по которым может осуществляться категорирование установок, могут быть использованы масса ядерных материалов и специальных неядерных материалов (или активность T), а также интенсивность термоядерного источника нейтронов. При этом возможна доработка численных критериев отнесения установок УТС к различным категориям ОИАЭ с учетом полученных данных о новых проектируемых и строящихся установках УТС.

Литература

1. Комплексная программа «Развитие техники, технологий и научных исследований в области использования атомной энергии в Российской Федерации на период до 2024 года»: Указ Президента Российской Федерации от 14.04.2022 № 202.
2. В России запущена термоядерная установка Токамак T-15MD. URL: <https://minobrnauki.gov.ru/press-center/news/novosti-ministerstva/33929/> (дата обращения: 12.09.2023).
3. Красильников А. В., Коновалов С. В., Бондарчук Э. Н., Мазуль И. В., Родин И. Ю., Минеев А. Б., Кузьмин Е. Г. и др. Токамак с реакторными технологиями (TRT): концепция, миссии, основные особенности и ожидаемые характеристики // Физика плазмы. 2021. Т. 47. № 11. С. 970–985. DOI 10.31857/S0367292121110196. EDN VMIZER.
4. Кутеев Б. В., Гончаров П. Р., Сергеев В. Ю., Хрипунов В. И. Мощные нейтронные источники на основе реакций ядерного синтеза // Физика плазмы. 2010. Т. 36. № 4. С. 307–346. EDN LOJUWX.
5. Азизов Э. А., Ананьев С. С., Беляков В. А., Бондарчук Э. Н., Воронова А. А., Голиков А. А., Гончаров П. Р. Токамак ДЕМО-ТИН: концепция электромагнитной системы и вакуумной камеры // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Термоядерный синтез. 2015. Т. 38. № 2. С. 5–18. DOI 10.21517/0202-3822-2015-38-2-5-18. EDN TVTOFB.
6. Отчет Комитета Государственной Думы по энергетике по итогам работы за 2022 год: утвержден решением Комитета Государственной Думы по энергетике № 3.25-5/56 от 21.12.2022. URL: <http://komitet-energo.duma.gov.ru/rabota-komiteta/otchet-o-rabote-komiteta/2de9463b-63b2-4873-b134-1294aa511723> (дата обращения: 12.09.2023).

7. Об утверждении СП 2.6.1.2612-10 «Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности (ОСПОРБ-99/2010)»: постановление Главного государственного санитарного врача Российской Федерации от 26.04.2010 № 40.

8. Об использовании атомной энергии: Федер. закон от 21.11.1995 № 170-ФЗ.

9. Соглашение о создании Международной организации ИТЭР по термоядерной энергии для совместной реализации проекта ИТЭР от 21.11.2006. URL: <https://docs.cntd.ru/document/902090032> (дата обращения: 12.09.2023).

10. О ратификации Соглашения о создании Международной организации ИТЭР по термоядерной энергии для совместной реализации проекта ИТЭР и Соглашения о привилегиях и иммунитетах Международной организации ИТЭР по термоядерной энергии для совместной реализации проекта ИТЭР: Федер. закон от 19.07.2007 № 143-ФЗ.

11. Техническое совещание МАГАТЭ по синергии между разработками в области технологий термоядерного синтеза и инновационных ядерных реакторов деления (Technical Meeting on Synergies in Technology Development between Nuclear Fission and Fusion for Energy Production). Австрия, г. Вена, 6–10 июня 2022 г. (гибридный формат). URL: <https://conferences.iaea.org/event/285/> (дата обращения: 12.09.2023).

12. Шарафутдинов Р. Б., Курындин А. В., Киркин А. М., Синегрибов С. В., Картова А. М. О необходимости совершенствования нормативной правовой базы в области использования атомной энергии для регулирования безопасности термоядерных установок // Ядерная и радиационная безопасность. 2021. № 3 (101). С. 5–15.

13. О радиационной безопасности населения: Федер. закон от 09.01.1996 № 3-ФЗ.

14. О санитарно-эпидемиологическом благополучии населения: Федер. закон от 30.03.1999 № 52-ФЗ.

15. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии. Правила ядерной безопасности для объектов ядерного топливного цикла. НП-063-05: утв. приказом Ростехнадзора от 20.12.2005 № 15.

16. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии. Основные правила учета и контроля ядерных материалов. НП-030-19: утв. приказом Ростехнадзора от 18.11.2019 № 438.

17. Об утверждении Положения о системе государственного учета и контроля ядерных материалов: постановление Правительства Российской Федерации от 06.05.2008 № 352.

18. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии. Основные правила учета и контроля радиоактивных веществ и радиоактивных отходов в организации. НП-067-16: утв. приказом Ростехнадзора от 28.11.2016 № 503.

19. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии. Общие положения обеспечения безопасности радиационных источников. НП-038-16: утв. приказом Ростехнадзора от 28.09.2016 № 405.

20. IAEA-TECDOC-1915. Considerations for Environmental Impact Assessment for Small Modular Reactors. IAEA, Vienna, 2020.

21. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии. Общие положения обеспечения безопасности исследовательских ядерных установок. НП-033-11: утв. приказом Ростехнадзора от 30.06.2011 № 348.

22. Тажибаева И. Л., Кенжин Е. А., Кульсартов Т. В., Бекман И. Н. Миграция трития в конструкционных и функциональных материалах ТЯР. Обзор и анализ результатов / Взаимодействие изотопов водорода с конструкционными материалами. IHISM'11 JUNIOR: сборник докладов Седьмой международной школы молодых ученых и специалистов. Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2012. С. 194–217.

23. Колбасов Б. Н., Хрипунов В. И., Бирюков А. Ю. Применение бериллия в термоядерных реакторах: ресурсы, примеси, детритизация после облучения // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Термоядерный синтез. 2013. Т. 36. № 4. С. 3–12. – EDN RMSFJD.

24. Khripunov V. I. 3-D study of PFC and dust activation in ITER. 22th IAEA Fusion Energy Conf. Geneva, Switzerland, October 13–18, 2008. URL: https://www.researchgate.net/profile/Vladimir-Khripunov/publication/228407860_3-D_Study_of_PFC_and_Dust_Activation_in_ITER/links/00b495201e49ba447e000000/3-D-Study-of-PFC-and-Dust-Activation-in-ITER.pdf (дата обращения: 12.09.2023).

25. Cambi G., Cepraga D. G., Pace L. Di, Druyts E., Massaut V. (2010). The potential presence and minimization of plutonium within the irradiated beryllium in fusion power plants. Fusion engineering and design, vol. 85, iss. 7, pp. 1139–1142. DOI 10.1016/j.fusengdes.2010.02.026.

26. Foundations of concept for a DEMO-S demonstration fusion power reactor. Part V. The reactor site. The external systems. Cost estimation of plant construction with the reactor DEMO-S. The station operating safety and the environmental effects. – RF Project DEMO. RRC “Kurchatov institute”, NFI, Moscow, 2001.
27. О лицензировании отдельных видов деятельности: Федер. закон от 04.05.2011 № 99-ФЗ.
28. Кутеев Б. В., Хрипунов В. И. Современный взгляд на гибридный термоядерный реактор // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Термоядерный синтез. 2009. Вып. 1. С. 3–29. – EDN JWWJQB.
29. Велихов Е. П., Ковальчук М. В., Азизов Э. А., Игнатьев В. В., Субботин С. А., Цибульский В. Ф. Термоядерный источник нейтронов для производства ядерного топлива // Атомная энергия. 2013. Т. 114. Вып. 3. С. 160–165. – EDN PУAHRЛ.

References

1. Kompleksnaya programma “Razvitije tehniki, tehnologij i nauchnyh issledovanij v oblasti ispol’zovaniya atomnoj energii na period do 2024 goda” [Comprehensive federal programme “Development of equipment, technologies and scientific research in the field of the use of atomic energy in the Russian Federation for the period up to 2024”. Russian Federation President Decree]. 2022.
2. V Rossii zapushchena termoyadernaya ustanovka Tokamak T-15MD [Tokamak T-15MD launched in Russia]. URL: <https://minobrnauki.gov.ru/press-center/news/novosti-ministerstva/33929/> (reference date: 12.09.2023).
3. Krasilnikov A. V., Konovalov S. V., Bondarchuk E. N., Mazul I. V., Rodin I. Yu., Mineev A. B., Kuzmin E. G., et al. (2021). Tokamak s reaktornymi tehnologijami (TRT): kontseptsii, missii, osnovnye osobennosti i ozhidaemye harakteristiki [Tokamak with reactor technologies (TRT): concept, missions, main features and expected parameters]. Fizika plazmy – Plasma Physics Reports, vol. 47, No. 11, pp. 970–985. DOI 10.31857/S0367292121110196. EDN BMIZER. [in Russian].
4. Kuteev B. V., Goncharov P. R., Sergeev V. YU., Khripunov V. I. (2010). Moshchnye neitronnye istochniki na osnove reaktsii yadernogo sinteza [Intense fusion neutron sources]. Fizika plazmy – Plasma physics reports, vol. 36, No. 4, pp. 281–317. DOI 10.1134/S1063780X1004001X. [in Russian]. EDN LOJUWX.
5. Azizov E. A., Anan'ev S. C., Belyakov V. A., Bondarchuk E. N., Voronova A. A., Golikov A. A., Goncharov P. R. (2015). Tokamak DEMO-TIN: kontseptsiya ehlektromagnitnoi sistemy i vakuumnoi kamery [Tokamak DEMO-FNS: concepts of magnet system and vacuum chamber]. Voprosy atomnoi nauki i tekhniki. Seriya: Termoyadernyi sintez – Problems of Atomic Science and Technology. Ser. Thermonuclear Fusion, vol. 38, iss. 2, pp. 5–18. DOI 10.21517/0202-3822-2015-38-2-5-18. [in Russian]. EDN TVTOFB.
6. Otchet Komiteta Gosudarstvennoj Dumy po energetike po itogam raboty za 2022 god: utverzhen resheniem Komiteta Gosudarstvennoj Dumy po energetike [Report of the State Duma Committee on Energy on the results of work for 2022: approved by the decision of the State Duma Committee on Energy]. URL: <http://komitet-energo.duma.gov.ru/rabota-komiteta/otchet-o-rabote-komiteta/> (reference date: 12.09.2023).
7. Postanovlenie Glavnogo gosudarstvennogo sanitarnogo vracha Rossijskoj Federacii “Ob utverzhenii SP 2.6.1.2612-10 “Osnovnye sanitarnye pravila obespechenija radiacionnoj bezopasnosti (OSPORB-99/2010)” [Decree of Chief Public Health Officer of the Russian Federation “On approval of SP 2.6.1.2612-10 “Basic sanitary rules for radiation safety (OSPORB-99/2010)”]. 2010.
8. Federal'nyi zakon No. 170-FZ “Ob ispol'zovanii atomnoi ehnergii” [Federal law No. 170-FZ “On the atomic energy use”]. 1995.
9. Soglashenie o sozdanii Mezhdunarodnoi organizatsii ITEHR po termoyadernoi ehnergii dlya sovmestnoi realizatsii proekta ITEHR ot 21.11.2006 [Agreement on the Establishment of the ITER International Fusion Energy Organization for the Joint Implementation of the ITER Project dated 21.11.2006]. URL: <https://www.iaea.org/sites/default/files/publications/documents/infcircs/2007/infcirc702.pdf> (reference date: 12.09.2023).
10. Federal'nyi zakon No. 143-FZ “O ratifikacii Soglasheniya o sozdanii mezhdunarodnoj organizatsii ITER po termoyadernoj energii dlya sovmestnoj realizatsii proekta ITER i Soglasheniya o privilegiiyah i immunitetah mezhdunarodnoj organizatsii ITER po termoyadernoj energii dlya sovmestnoj realizatsii proekta ITER” [Federal law No. 143-FZ “On ratification of the Agreement on the Establishment of the ITER International Fusion Energy Organization for the Joint Implementation of the ITER Project and the Agreement on the Privileges and Immunities of the ITER International Fusion Energy Organization for the Joint Implementation of the ITER Project”]. 2007.

11. Technical Meeting on Synergies in Technology Development between Nuclear Fission and Fusion for Energy Production. Austria, Vienna, 6–10 June 2022 (virtual participation). URL: <https://conferences.iaea.org/event/285/> (reference date: 12.09.2023).

12. Sharafutdinov R. B., Kuryndin A. V., Kirkin A. M., Sinegribov S. V., Kartova A. M. (2021). O neobkhodimosti sovershenstvovaniya normativnoi pravovoi bazy v oblasti ispol'zovaniya atomnoi ehnergii dlya regulirovaniya bezopasnosti termoyadernykh ustanovok [On the necessity of improvement of legal and regulatory framework in the field of atomic energy use for fusion regulation]. *Yadernaya i radiatsionnaya bezopasnost' – Nuclear and Radiation Safety Journal*, No. 3 (101), pp. 5–15. DOI: 10.26277/SECNRS.2021.101.3.001 [in Russian].

13. Federal'nyi zakon No. 3-FZ “O radiacionnoj bezopasnosti naselenija” [Federal law No. 3-FZ “On the radiation safety of the population”]. 1996.

14. Federal'nyi zakon No. 52-FZ “O sanitarno-jepidemiologicheskom blagopoluchii naselenija” [Federal law No. 52-FZ “On the sanitary and epidemiological welfare of the population”]. 1999.

15. Federal'nye normy i pravila v oblasti ispol'zovaniya atomnoj energii “Pravila jadernoy bezopasnosti dlja objektov jadernogo toplivnogo tsikla” (NP-063-05) [Federal rules and regulations in the field of atomic energy use “Rules of nuclear safety of the nuclear fuel cycle facilities” (NP-063-05)]. 2005.

16. Federal'nye normy i pravila v oblasti ispol'zovaniya atomnoj energii “Osnovnye pravila ucheta i kontrolja jadernykh materialov” (NP-030-19) [Federal rules and regulations in the field of atomic energy use “Basic rules of accounting and control of nuclear materials” (NP-030-19)]. 2019.

17. Postanovlenie Pravitel'stva Rossijskoj Federacii “Ob utverzhdenii Polozhenija o sisteme gosudarstvennogo ucheta i kontrolja jadernykh materialov” [Russian Federation Government Decree “On approval of the Regulations on the system of state accounting and control of nuclear materials”]. 2008.

18. Federal'nye normy i pravila v oblasti ispol'zovaniya atomnoj energii “Osnovnye pravila ucheta i kontrolja radioaktivnykh veshhestv i radioaktivnykh othodov v organizacii” (NP-067-16) [Federal rules and regulations in the field of atomic energy use “Basic rules of accounting and control of radioactive substances and radioactive waste in organization” (NP-067-16)]. 2016.

19. Federal'nye normy i pravila v oblasti ispol'zovaniya atomnoj energii “Obshhie polozhenija obespechenija bezopasnosti radiacionnykh istochnikov” (NP-038-16) [Federal rules and regulations in the field of atomic energy use “General provisions of safety assurance for radioactive sources” (NP-038-16)]. 2016.

20. IAEA-TECDOC-1915. Considerations for Environmental Impact Assessment for Small Modular Reactors. IAEA, Vienna, 2020.

21. Federal'nye normy i pravila v oblasti ispol'zovaniya atomnoj energii “Obshhie polozhenija obespechenija bezopasnosti issledovatel'skih jadernykh ustanovok” (NP-033-11) [Federal rules and regulations in the field of atomic energy use “General safety provisions of nuclear research installations” (NP-033-11)]. 2011.

22. Tazhibayeva I. L., Kenzhin E. A., Kul'sartov T. V., Bekman I. N. (2012). Migracija tritija v konstrukcionnyh i funkcional'nyh materialah TJaR. Obzor i analiz rezul'tatov [Migration of tritium in structural and functional materials of FR. Review and analysis of results]. *Vzaimodejstvie izotopov vodoroda s konstrukcionnymi materialami. IHISM'11 JUNIOR: sbornik dokladov Sed'moj mezhdunarodnoj shkoly molodyh uchenykh i specialistov – Interaction Hydrogen Isotopes with Structural Materials. IHISM'11 JUNIOR: Seventh International School of Young Scientists and Specialists Proceedings*. Sarov: FSUE RFNC – VNIIEF. Pp. 149–173 [in Russian].

23. Kolbasov B. N., Khripunov V. I., Biryukov A. YU. (2013). Primenenie berilliya v termoyadernykh reaktorakh: resursy, primesi, detritizatsiya posle oblucheniya [Some thoughts about beryllium resources, impurities in it and necessity of its detritiation after irradiation]. *Voprosy atomnoi nauki i tekhniki. Seriya: Termoyadernyi sintez – Problems of Atomic Science and Technology. Ser. Termoyadernyi sintez*, vol. 36, iss. 4, pp. 3–12. [in Russian]. EDN RMSFJD.

24. Khripunov V. I. 3-D study of PFC and dust activation in ITER. 22th IAEA Fusion Energy Conf. Geneva, Switzerland, October 13–18, 2008. URL: https://www.researchgate.net/profile/Vladimir-Khripunov/publication/228407860_3-D_Study_of_PFC_and_Dust_Activation_in_ITER/links/00b495201e49ba447e000000/3-D-Study-of-PFC-and-Dust-Activation-in-ITER.pdf (reference date: 12.09.2023).

25. Cambi G., Cepraga D. G., Pace L. Di, Druyts E., Massaut V. (2010). The potential presence and minimization of plutonium within the irradiated beryllium in fusion power plants. *Fusion engineering and design*, vol. 85, iss. 7, pp. 1139–1142. DOI 10.1016/j.fusengdes.2010.02.026.

26. Foundations of concept for a DEMO-S demonstration fusion power reactor. Part V. The reactor site. The external systems. Cost estimation of plant construction with the reactor DEMO-S. The station operating safety and the environmental effects. – RF Project DEMO. RRC “Kurchatov institute”, NFI, Moscow, 2001.

27. Federal'nyi zakon No. 99-FZ “O licenzirovaniy ot del'nykh vidov dejatel'nosti” [Federal law No. 99-FZ “On licensing of certain types of activities”]. 2011.

28. Kuteev B. V., Khripunov V. I. (2009). Sovremennyy vzglyad na gibridnyy termoyadernyy reaktor [Current view on the hybrid fusion reactor]. Voprosy atomnoy nauki i tekhniki. Seriya: Termoyadernyy sintez – Problems of Atomic Science and Technology Ser. Thermonuclear Fusion, vol. 47, pp. 3–29. [in Russian]. EDN JWWJQB.

29. Velikhov E. P., Koval'chuk M. V., Azizov E. H. A., Ignat'ev V. V., Subbotin S. A., Tsibul'skii V. F. (2013). Termoyadernyy istochnik neitronov dlya proizvodstva yadernogo topliva [Hybrid fusion reactor for production of nuclear fuel that minimally pollutes fuel cycle with radioactivity]. Atomnaya ehnergiya – Atomic Energy, vol. 37, pp. 160–165. [in Russian]. EDN PYAHRL.

Сведения об авторах

Киркин Андрей Михайлович, начальник отдела безопасности атомных станций и инновационных ядерных установок отделения ядерной и радиационной безопасности, федеральное бюджетное учреждение «Научно-технический центр по ядерной и радиационной безопасности» (107140, Москва, ул. Малая Красносельская, д. 2/8, корп. 5).

Курындин Антон Владимирович, руководитель отделения ядерной и радиационной безопасности, федеральное бюджетное учреждение «Научно-технический центр по ядерной и радиационной безопасности» (107140, Москва, ул. Малая Красносельская, д. 2/8, корп. 5).

Приходько Андрей Викторович, заведующий отделом разработки и информационно-аналитического сопровождения программ по ядерной и радиационной безопасности, Институт проблем безопасного развития атомной энергетики Российской академии наук (ИБРАЭ РАН) (115191, Москва, Б. Тульская ул., д. 52).

Симонова Анастасия Владимировна, старший научный сотрудник отдела безопасности исследовательских и транспортных ядерных установок отделения ядерной и радиационной безопасности, федеральное бюджетное учреждение «Научно-технический центр по ядерной и радиационной безопасности» (107140, Москва, ул. Малая Красносельская, д. 2/8, корп. 5).

Синегрибов Сергей Владимирович, начальник лаборатории отдела безопасности атомных станций и инновационных ядерных установок отделения ядерной и радиационной безопасности, федеральное бюджетное учреждение «Научно-технический центр по ядерной и радиационной безопасности» (107140, Москва, ул. Малая Красносельская, д. 2/8, корп. 5).

Смирнов Арсений Олегович, младший научный сотрудник отдела безопасности атомных станций и инновационных ядерных установок отделения ядерной и радиационной безопасности, федеральное бюджетное учреждение «Научно-технический центр по ядерной и радиационной безопасности» (107140, Москва, ул. Малая Красносельская, д. 2/8, корп. 5).

Шпиньков Вячеслав Игоревич, главный специалист, Институт проблем безопасного развития атомной энергетики Российской академии наук (ИБРАЭ РАН) (115191, Москва, Б. Тульская ул., д. 52).

Authors credentials

Kirkin Andrey Mikchaylovich, Head of the Nuclear Power Plants and Innovative Nuclear Installations Safety Division of Nuclear and Radiation Safety Department, Scientific and Engineering Centre for Nuclear and Radiation Safety (2/8, bld. 5, Malaya Krasnoselskaya str., Moscow, 107140), e-mail: kirkin@secnrs.ru.

Kuryndin Anton Vladimirovich, Head of Nuclear and Radiation Safety Department, Scientific and Engineering Centre for Nuclear and Radiation Safety (2/8, bld. 5, Malaya Krasnoselskaya str., Moscow, 107140), e-mail: kuryndin@secnrs.ru.

Prihodko Andrey Viktorovich, Head of Development and Information and Analytical Support of Nuclear and Radiation Safety Programs Division, Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences (IBRAE RAN) (52, Bolshaya Tulsкая str., Moscow, 115191), e-mail: pav@ibrae.ac.ru.

Simonova Anastasiia Vladimirovna, Senior Scientific Researcher of the Research and Transport Nuclear Installations Safety Division of Nuclear and Radiation Safety Department, Scientific and Engineering Centre for Nuclear and Radiation Safety (2/8, bld. 5, Malaya Krasnoselskaya str., Moscow, 107140), e-mail: simonova@secnrs.ru.

Sinegribov Sergey Vladimirovich, Head of Laboratory on Safety of Innovative Nuclear Installations of the Nuclear Power Plants and Innovative Nuclear Installations Safety Division of Nuclear and Radiation Safety Department, Scientific and Engineering Centre for Nuclear and Radiation Safety (2/8, bld. 5, Malaya Krasnoselskaya str., Moscow, 107140), e-mail: sinegribov@secnrs.ru.

Smirnov Arsenii Olegovich, Junior Scientific Researcher of the Nuclear Power Plants and Innovative Nuclear Installations Safety Division of Nuclear and Radiation Safety Department, Scientific and Engineering Centre for Nuclear and Radiation Safety (2/8, bld. 5, Malaya Krasnoselskaya str., Moscow, 107140), e-mail: asmirnov@secnrs.ru.

Shpinkov Vyacheslav Igorevich, Chief Specialist, Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences (IBRAE RAN) (52, Bolshaya Tulsкая str., Moscow, 115191), e-mail: shvi@ibrae.ac.ru.

Для цитирования

Куркин А. М., Курьиндин А. В., Приходько А. В., Симонова А. В., Синегрибов С. В., Смирнов А. О., Шпиньков В. И. Возможные критерии для отнесения установок управляемого термоядерного синтеза к объектам использования атомной энергии // Ядерная и радиационная безопасность. 2023. № 3 (109). С. 20–35. DOI: 10.26277/SECNRS.2023.109.3.002.

For citation

Kirkin A. M., Kuryndin A. V., Prihodko A. V., Simonova A. V., Sinegribov S. V., Smirnov A. O., Shpinkov V. I. Possible criteria for fusion facilities classification as nuclear facilities. Nuclear and Radiation Safety Journal, 2023, No. 3 (109), pp. 20–35. DOI: 10.26277/SECNRS.2023.109.3.002 [in Russian].

