

УДК: 621.039.58

DOI: 10.26277/SECNRS.2021.102.4.002

© 2021. Все права защищены.

## О ПОДХОДАХ К РЕГУЛИРОВАНИЮ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ТОЛЕРАНТНОГО ЯДЕРНОГО ТОПЛИВА

Курындин А. В.\* (kuryndin@secnrs.ru),

Киркин А. М.\* (kirkin@secnrs.ru),

Каримов А. З.\* (karimov@secnrs.ru),

Маковский С. В.\* (makovskiy@secnrs.ru)

Статья поступила в редакцию 21 сентября 2021 г.

### Аннотация

В настоящее время в Российской Федерации и в мире ведется активная разработка и внедрение новых типов толерантного ядерного топлива, которое потенциально является более устойчивым к нарушениям нормальной эксплуатации, характерным для реакторов на тепловых нейтронах, в частности, к пароциркониевой реакции. Повышенная устойчивость толерантного ядерного топлива достигается за счет изменения оболочки твэлов или топливной матрицы. В ряде стран, включая Российскую Федерацию, уже осуществляются экспериментальные исследования свойств толерантного ядерного топлива на исследовательских ядерных установках и проводится опытно-промышленная эксплуатация отдельных твэлов такого типа на энергоблоках атомных станций. При этом внедрение толерантного ядерного топлива связано с изменением существующих технологий производства твэлов и тепловыделяющих сборок, а также изменением их конструкции, что требует выполнения соответствующего обоснования безопасности и оценки безопасности, проводимой органом регулирования безопасности при использовании атомной энергии. Однако, как в Российской Федерации, так и в других странах имеется весьма ограниченный опыт лицензирования применения толерантного ядерного топлива. В настоящей статье представлен обзорный анализ состояния внедрения толерантного ядерного топлива, а также рассмотрены возможные подходы к регулированию безопасности при внедрении ядерного топлива подобного типа.

► **Ключевые слова:** толерантное ядерное топливо, лицензирование, регулирование безопасности.

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

## ON APPROACHES TO REGULATION OF ACCIDENT TOLERANT FUEL APPLICATION

Kuryndin A. V.\*, Ph. D.,

Kirkin A. M.\*,

Karimov A. Z.\*,

Makovskiy S. V.\*

Article is received on September 21, 2021

### *Abstract*

*Currently, active development and introduction of new types of accident tolerant fuel is ongoing in the Russian Federation and worldwide. This type of fuel is potentially more resistant to accident conditions, that are typical for thermal reactors and to the steam-zirconium reaction in particular. The increased stability of accident tolerant fuel is achieved by changing the fuel rods cladding or the fuel matrix. In a number of countries, including the Russian Federation, experimental studies of the accident tolerant fuel properties are already carried out at research facilities. Also pilot operation of individual fuel rods of a tolerant type is carried out at power units of nuclear power plants. At the same time the introduction of accident tolerant fuel is associated with a change in existing technologies of fuel rods and fuel assemblies production, as well as with a change in their design. This requires the implementation of an appropriate safety justification and a safety assessment, which is organized by the regulatory body. However the Russian Federation as well as other countries has only limited and insufficient experience in the field of licensing of accident tolerant fuel application. This article contains a brief review of accident tolerant fuel introduction process and presents some possible approaches to safety regulation of such fuel introduction.*

► **Keywords:** *accident tolerant fuel, licensing, safety regulation.*

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

### Предпосылки появления толерантного ядерного топлива

В настоящее время основными материалами, наиболее широко используемыми в мировой практике для производства оболочек тепловыделяющих элементов (ТВЭЛОВ) энергетических реакторов на тепловых нейтронах, являются различные сплавы циркония. Так, в Российской Федерации на протяжении многих лет используются сплавы типа Э110, Э125 и другие, которые представляют собой сплав циркония и ниобия [1]. Из зарубежных аналогов могут быть отмечены циркониевые сплавы типа Zircaloy, а также сплав ZIRLO, которые применяются в США [2]. По своим свойствам указанные российские и зарубежные сплавы в целом близки, однако традиционные для российских атомных станций (АС) сплавы Э110 и Э125 имеют меньшую склонность к гидрированию металла за счет меньшего количества примесей, в то время как американские аналоги являются более коррозионно-стойкими и имеют более низкое сечение поглощения нейтронов. Примеры составов циркониевых сплавов приведены в таблице [1, 2].

Одним из основных преимуществ циркониевых сплавов при их использовании в качестве оболочек ТВЭЛОВ в реакторах на тепловых нейтронах являются их технико-экономические показатели, широкая апробация (накопленный положительный опыт их применения составляет более пятидесяти лет), а также малое влияние на нейтронно-физические характеристики реактора. Надежность эксплуатации ядерного топлива с циркониевой оболочкой и топливной композицией из  $UO_2$  объясняется длительной коррозионной стойкостью и сохранением пластических свойств.

Тем не менее, применяемое повсеместно ядерное топливо из  $UO_2$  с циркониевой оболочкой обладает также и рядом недостатков, среди которых можно отметить следующие:

- сравнительно малая теплопроводность топливной матрицы;
- охрупчивание оболочки в результате гидрирования водородом.

При нарушениях нормальной эксплуатации наибольшую опасность представляет экзотермическая реакция циркония с водяным паром при температурах более 850 °С (пароциркониевая реакция), в ходе которой выделяется значительное количество тепла (более 6 500 кДж/кг), что может привести к катастрофическому разогреву оболочки ТВЭЛОВ, ее разрушению, а также плавлению ядерного топлива (рис. 1) [3]. Вместе с тем интенсивность указанной реакции возрастает с увеличением температуры, что, с учетом выделения тепла при реакции, приводит к возникновению самоподдерживающейся реакции. Кроме того, при данной реакции выделяется большое количество атомарного водорода, что приводит к риску возникновения взрывов.

Пароциркониевая реакция являлась отягчающим фактором при всех масштабных авариях в истории ядерной энергетики (включая аварии на АЭС «Фукусима-Дайичи», Чернобыльской АЭС и АЭС «Три-Майл-Айленд») [4]. Ее наличие подрывает внутреннюю самозащищенность реакторных установок, которая в соответствии с требованиями НП-001-15 [5] является одной из определяющих составляющих первого уровня глубокоэшелонированной защиты.

Для устранения указанных недостатков и развития свойства внутренней самозащищенности реакторных установок в настоящее время в мире

Таблица

Составы основных применяемых в атомной энергетике циркониевых сплавов  
Compound of main zirconium alloys used in nuclear industry

Химический элемент	Химический состав, %			
	Циркалой-2	Циркалой-4	Сплав Э110	Сплав Э125
Zr	98,6–97,8	98,4–97,8	~99,0	~97,5
Nb	–	–	1,0	2,5
Sn	1,2–1,7	1,2–1,7	–	–
Fe	0,05–0,15	0,18–0,24	–	–
Cr	0,07–0,20	0,07–0,13	–	–
Ni	0,03–0,08	–	–	–



Рис. 1. Разрушение топлива в результате пароциркониевой реакции  
[Fig. 1. Destruction of fuel due to steam-zirconium reaction]

активно прорабатывается концепция топлива с характеристиками, улучшающими его работоспособность и целостность при нарушениях нормальной эксплуатации, обусловленных, прежде всего, вводом избыточной реактивности (аварии типа RIA, от англ. Reactivity Initiated Accident) и потерей теплоносителя (аварии типа LOCA, от англ. Lose of Coolant Accident). За подобным топливом в мировой практике закрепились термины «топливо с повышенной устойчивостью к авариям» или «толерантное ядерное топливо» (от англ. Accident Tolerant Fuel (ATF)). В настоящее время предлагаются следующие основные концептуальные подходы к разработке толерантного ядерного топлива [6]:

- изменение материала оболочки твэлов и повышение ее устойчивости к окислению (применение легирующих покрытий из хрома, замена циркониевого сплава на сталь или керамический материал);
- применение других типов топливной матрицы (в частности,  $UO_2$  и  $U_3Si_2$ );
- комбинация указанных вариантов.

Каждая из технологий толерантного ядерного топлива обладает различными преимуществами и недостатками, а основными задачами при выборе определенной технологии являются оптимизация свойств ядерного топлива и оптимизация затрат на их внедрение, производство и эксплуатацию. При этом к основным преимуществам толерантного ядерного топлива могут быть отнесены отсутствие либо более позднее возникновение пароциркониевой реакции, более высокая радиационная, коррозионная и термическая стойкость оболочек, а также повышенная теплопроводность ядерного топлива [6].

### Внедрение толерантного ядерного топлива в мире

Наиболее активно проекты по исследованию толерантного ядерного топлива и его внедрению в эксплуатацию на АЭС осуществляются в США, где эти работы ведутся в соответствии с инвестиционной программой Министерства энергетики (United States Department of Energy – DOE) [7]. В рамках программы [7] в период с 2018 по 2021 гг. осуществляется облучение отдельных твэлов с толерантным ядерным топливом в исследовательских и энергетических реакторах. Прорабатываются следующие возможные технологии толерантного ядерного топлива:

- “IronClad” (твэлы с оболочками из стали с включениями хрома и алюминия) и “ARMOR” (твэлы с хромированной циркониевой оболочкой), разработаны компанией “General Electric”, отдельные твэлы облучались на АЭС “Edwin I. Hatch” [8];
- “EnCore” (твэлы с хромированной циркониевой оболочкой, в топливную матрицу дополнительно включаются  $Cr_2B_3$  и  $Al_2O_3$ ) разработано компанией “Westinghouse”, отдельные твэлы облучаются на АЭС “Bygon” (США) и “Doel” (Бельгия) [9, 10];
- твэлы типа “GAIA” с модернизированной топливной матрицей ( $UO_2$  с включениями  $Cr_2B_3$ ) и хромированной циркониевой оболочкой (разработаны французской компанией “Framatome”, облучались на АЭС “Vogtle”) [11].

Кроме того, на 2022 г. в США запланированы испытания разрабатываемого компанией “Westinghouse” топлива с оболочкой из SiC и топливной матрицей из  $U_3Si_2$ . В планы DOE входит осуществить полную загрузку активной зоны энерго-

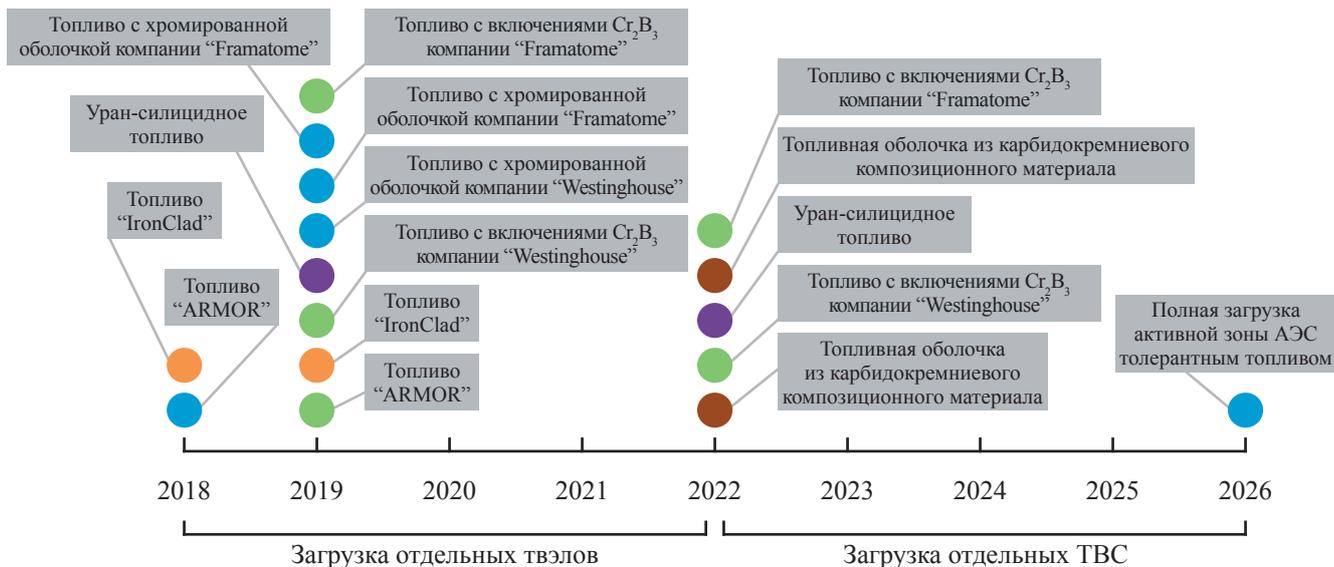


Рис. 2. Обзор запланированных в США работ по внедрению толерантного ядерного топлива [Fig. 2. Review of the planned work on the introduction of accident tolerant fuel in the USA]

блока одной из АЭС толерантным ядерным топливом к 2026 г. (рис. 2) [7].

Помимо США работы по исследованию толерантного ядерного топлива активизируются также в ряде других стран. В частности, изучение свойств различных вариантов толерантного ядерного топлива осуществляется в Японии и Южной Корее. Также подобные работы проводятся в Китае, где одновременно реализованы исследования нескольких концепций толерантного ядерного топлива, включая проведение реакторных исследований возможных материалов для толерантного ядерного топлива [12]. Вместе с тем степень проработки таких исследований ниже по сравнению с аналогичными работами в США.

В Российской Федерации работы по внедрению толерантного ядерного топлива также идут, но с некоторым отставанием. В настоящее время прорабатывается возможность внедрения толерантного ядерного топлива следующих типов [13]:

- с оболочкой твэлов из сплава Э110 с покрытием из Cr;
- с оболочкой из сплава 42ХНМ;
- с оболочкой из новых сплавов и топливной матрицей из UMo или U<sub>3</sub>Si<sub>2</sub>.

В отношении твэлов с покрытием из Cr в Российской Федерации разработан собственный метод нанесения покрытия, основанный на высокоскоростном ионно-плазменном магнетронном напылении [14]. В 2021 г. на энергоблоке № 2 Ростовской АЭС начата опытно-промышленная эксплуатация твэлов с оболочками из сплавов Э110 и 42ХНМ (топливная матрица – UO<sub>2</sub>).

### Подходы к регулированию безопасности при внедрении толерантного ядерного топлива

Разработка альтернативных оболочек твэлов для легководных реакторов связана с революционным изменением технологии производства твэлов, конструкции тепловыделяющих сборок (ТВС) и активной зоны, а также физики реактора. Внедрение толерантного ядерного топлива означает, по сути, создание нового типа реактора и достижение качественно нового уровня науки и техники. Однако, как и любая другая технология, внедряемая в области использования атомной энергии, применение толерантного ядерного топлива должно быть апробировано и обосновано, а оценки безопасности его применения являются предметом экспертизы, организуемой органом регулирования безопасности при использовании атомной энергии.

Нормативная правовая база Российской Федерации содержит только ограниченный набор требований в отношении ТВС. Так, существующие требования по обоснованию безопасности любых компонентов реакторных установок АС (установленные в НП-001-15 [5] и НП-082-07 [15]) содержат конкретные положения в отношении ряда систем и элементов, важных для безопасности (в частности, активной зоны в целом, систем управления и защиты, контура теплоносителя и других), однако не устанавливают каких-либо специфических требований к ядерному топливу. Например, п. 2.1.4 НП-082-07 [15] устанавливает требование о выполнении «необходимых стендовых и реакторных исследований», а также об обосновании «достаточности проведенных исследований для доказательства выполнения

критериев безопасности» при внедрении нового ядерного топлива. Вместе с тем в федеральных нормах и правилах в области использования атомной энергии не раскрываются перечень и требования к испытаниям при внедрении нового ядерного топлива, а также не определяются критерии безопасности нового ядерного топлива. Аналогичные положения содержатся и в НП-001-15 [5], согласно положениям которых обеспечение безопасности АС (включая внедрение новых видов ядерного топлива) должно быть апробировано прежним опытом, испытаниями, исследованиями, опытом эксплуатации прототипов. Однако критерии для проведения упомянутых испытаний и исследований, а также требования к прототипам в указанном документе отсутствуют.

Нормативным документом, в котором содержатся наиболее подробные требования к конструкции ТВС, является НП-094-15 [16]. Вместе с тем, несмотря на широкий спектр установленных в нем критериев, данный документ не является полностью достаточным для покрытия всех аспектов обеспечения безопасности ядерного топлива. Так, область его распространения не содержит требований к ТВС реакторов, отличных от реакторов типа ВВЭР. Кроме того, требования данного документа ограничиваются только положениями в отношении прочности и термомеханического поведения ТВС при их эксплуатации в активной зоне, в то время как какие-либо требования к постановке ТВС на производство, контролю их качества, а также термомеханическим критериям ТВС за пределами активной зоны (например, при долговременном хранении) отсутствуют. Таким образом, к настоящему времени в нормативной правовой базе Российской Федерации не выработан комплексный подход в отношении требований к ТВС.

При этом необходимо отметить, что подобная проблема не является уникальной для Российской Федерации. Так, в частности, в США Комиссией по ядерному регулированию (NRC) до настоящего времени также не выработаны единые подходы к лицензированию при внедрении толерантного ядерного топлива, введение которых осложняется значительной вариативностью характеристик такого топлива в зависимости от производителя. Обязательные требования безопасности при использовании атомной энергии в США, отраженные в разделе 10 свода федеральных нормативных актов (10 CFR [17]), разработаны исходя из предположения, что на АС в качестве топлива применяются твэлы с оболочками из циркониевых сплавов. Документов рекомендательного уровня,

содержащих описание подходов к обоснованию безопасности применения толерантного ядерного топлива, NRC до недавнего времени разработано также не было.

Вместе с тем, с учетом активного внедрения толерантного ядерного топлива в 2019 г., NRC разработан План проведения работ по его лицензированию [18], предусматривающий комплекс работ, направленных на получение сотрудниками регулирующего органа соответствующих знаний и компетенций, которые позволят повысить эффективность оценки обоснований безопасности внедрения новых типов топлива. Также Планом [18] предусматривается проведение анализа действующих нормативных документов на предмет необходимости внесения в них изменений после накопления достаточного опыта работ по анализу обоснований безопасности. Помимо Плана [18] к настоящему времени NRC также разработаны рекомендации по проведению оценок обоснований безопасности применения толерантного ядерного топлива с хромированной циркониевой оболочкой [19]. Обобщенно подходы к нормативному обеспечению внедрения толерантного ядерного топлива в США проиллюстрированы на рис. 3.

Особая роль Планом [18] отводится более широкому вовлечению регулятора в работы по экспериментальному обоснованию толерантного ядерного топлива на ранних стадиях, а также взаимодействию с разработчиками ядерного топлива, проектными организациями и эксплуатирующими организациями по вопросам внедрения толерантного ядерного топлива. Следует отметить, что подобная практика в США является повсеместной при апробации новых технологий и осуществляется в развитие Меморандума о взаимодействии между NRC и DOE [20], предусматривающего широкий обмен информацией о выполняемых исследованиях и практике лицензирования.

С точки зрения обоснований безопасности внедрения толерантного ядерного топлива NRC придерживается комплексного подхода, сочетающего в себе как проведение экспериментальных исследований, так и выполнение расчетных обоснований безопасности на всех стадиях внедрения топлива. Стадийность принимаемого в соответствии с Планом [18] подхода проиллюстрирована на рис. 4. Предусмотренные Планом [18] работы по экспериментальному обоснованию безопасности применения толерантного ядерного топлива включают в себя стендовые испытания, испытания



Рис. 3. Нормативное обеспечение внедрения толерантного ядерного топлива в США  
 [Fig. 3. Regulatory basis for the introduction of accident tolerant fuel in the USA]

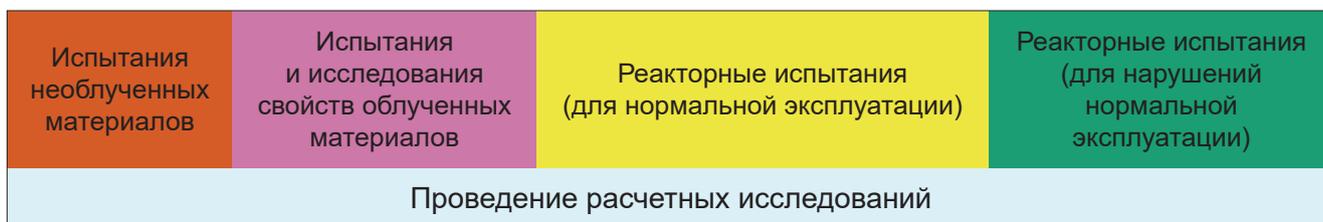


Рис. 4. Иллюстрация совокупности подходов к обоснованию безопасности внедрения толерантного ядерного топлива в США  
 [Fig. 4. Illustration of approaches to safety justification of accident tolerant fuel introduction in the USA]

в исследовательских ядерных реакторах, а также испытания отдельных твэлов в энергетических реакторах. Также DOE на период до 2024 г. запланирован комплекс работ по испытаниям толерантного ядерного топлива в режимах, моделирующих нарушения нормальной эксплуатации реакторной установки [21], которые включают в себя моделирование аварийных процессов, связанных с вводом избыточной реактивности, потерей теплоносителя, а также скачкообразным изменением мощности.

В Российской Федерации в настоящее время также начаты работы по экспериментальному обоснованию толерантного ядерного топлива, которые включают в себя облучение двух экспериментальных ТВС в активной зоне реактора МИР-М1 АО «ГНЦ НИИАР» [22]. Каждая из ТВС содержит по 24 твэла, их топливные таблетки изготовлены как из традиционного  $UO_2$ , так и из  $UMo$ , а при создании оболочек использован либо хромированный циркониевый сплав, либо хромо-никелевая сталь. Результаты подобных экспериментальных работ представляют несомненную ценность для проведения дальнейших обоснований безопасности внедрения толерантного ядерного топлива на российских АС.

### Заключение

Толерантное ядерное топливо представляет собой новую ступень поступательного развития атомной энергетики, а его применение потенциально может повысить достигнутый уровень безопасности ядерных установок с реакторами на тепловых нейтронах. При этом, по мнению авторов статьи, внедрение толерантного ядерного топлива следует осуществлять поэтапно с выполнением необходимого комплекса исследований. Хорошей практикой представляется подход, принятый NRC в США, который заключается в проведении комплекса дореакторных исследований новых материалов, проведении исследований в исследовательских и (для отдельных твэлов) энергетических реакторах, а также в выполнении комплекса работ по анализу поведения толерантного ядерного топлива в аварийных режимах на исследовательских ядерных установках. Целесообразным и конструктивным также является осуществление взаимодействий между регулятором и эксплуатирующими и проектными организациями на ранних стадиях внедрения толерантного ядерного топлива.

Вместе с тем основной акцент должен быть сделан на выработку единых подходов к экспериментальному обоснованию безопасности новых типов ядерного топлива, которые должны включать в себя как расчетные исследования различных параметров безопасности, так и проведение экспериментальных исследований. В соответствующие программы исследований следует включать стендовые испытания макетов твэлов и ТВС, испытания в исследовательских ядерных установках, моделирующие различные режимы реакторных установок, а также испытания отдельных твэлов в энергетических реакторах. Целесообразно также проведение дополнительного анализа применимости существующих программных средств для целей расчетного обоснования безопасности при использовании ядерного топлива новых типов и при

необходимости выполнения их аттестации в установленном порядке.

Кроме того, по мнению авторов статьи, особый акцент должен быть сделан на разработке конкретных специфических требований в отношении проектирования, конструирования, изготовления, испытаний и эксплуатации ТВС, в которых следует установить основные функциональные требования к топливу, требования к порядку разработки, испытаниям имитаторов и опытных образцов, а также требования к изготовлению твэлов и ТВС. Наличие подобных специфических требований потенциально позволит улучшить контроль за процессами внедрения нового ядерного топлива на АС, а также упростить процесс лицензирования за счет наличия однозначных критериев безопасности.

### Литература

1. Займовский А. С., Никулина А. В., Решетников Н. Г. Циркониевые сплавы в атомной энергетике. – М.: Энергоиздат, 1981. – 232 с.
2. Optimized ZIRLO High-performance Fuel Cladding Material. Westinghouse Electric Company, NF-FE-0046, 2016.
3. Zinkle S. J., Terrani K. A., Gehin J. C., Ott L. J., Snead L. L. Accident Tolerant Fuels for LWRs: a Perspective // Journal of Nuclear Materials. 2014. Volume 448. Issues 1–3.
4. Analysis of Three Mile Island – Unit 2 Accident. Nuclear Safety Analysis Center, Electronic Power Research Institute, NSAC-80-1, NSAC-1, March, 1980.
5. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии. Общие положения обеспечения безопасности атомных станций. НП-001-15: утверждены приказом Ростехнадзора от 17.12.2015 № 522.
6. State-of-the-Art Report on Light Water Reactor Accident-Tolerant Fuels. Nuclear Energy Agency. Organisation for Economic Co-Operation and Development. NEA Report No. 7317, Nuclear science, 2018.
7. Development of Light Water Reactor Fuels with Enhanced Accident Tolerance, Report to Congress. United States Department of Energy, June 2015.
8. GNF Delivers Accident Tolerant Fuel Assemblies for Plant Installation. URL: <https://www.ge.com/news/press-releases/gnf-delivers-accident-tolerant-fuel-assemblies-plant-installation> (дата обращения: 12.11.2021).
9. Exelon's Byron 2 Completes First Insertion of Westinghouse Accident-Tolerant Fuel. URL: <https://www.powermag.com/exelons-byron-2-completes-first-insertion-of-westinghouse-accident-tolerant-fuel/> (дата обращения: 12.11.2021).
10. First European Reactor Loads EnCore Accident Tolerant Fuel. URL: <https://www.world-nuclear-news.org/Articles/First-European-reactor-loads-EnCore-accident-tolerant> (дата обращения: 12.11.2021).
11. Vogtle 2 Installs World's First Full Accident-Tolerant Fuel Assemblies. URL: <https://www.powermag.com/vogtle-2-installs-worlds-first-accident-tolerant-nuclear-fuel-assemblies> (дата обращения: 12.11.2021).
12. Chinese-developed ATF Undergoing Irradiation Tests. URL: <https://www.world-nuclear-news.org/Articles/Chinese-developed-ATF-undergoing-irradiation-tests> (дата обращения: 12.11.2021).
13. Новиков В. В., Карпюк Л. А., Орлов В. К., Кулаков Г. В. и др. Разработка толерантного топлива / НТК-2018 «Ядерное топливо нового поколения для АЭС. Результаты разработки, опыт эксплуатации и направления развития» (9–10 октября 2018 г.). – Сочи, 2018.
14. Карпюк Л. А., Краснобаев Н. Н., Маслов А. А., Новиков В. В. и др. Магнетронное напыление жаростойких покрытий оболочек толерантных твэлов // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Материаловедение и новые материалы. 2020. № 5. С. 4–37.

15. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии. Правила ядерной безопасности реакторных установок атомных станций. НП-082-07: утверждены постановлением Ростехнадзора от 10.12.2007 № 4.

16. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии. Основные требования к обоснованию прочности и термомеханического поведения тепловыделяющих сборок и тепловыделяющих элементов в активной зоне водо-водяных энергетических реакторов. НП-094-15: утверждены приказом Ростехнадзора от 18.01.2016 № 13.

17. Code of Federal Regulations. U. S. Government Publishing Office. URL: <https://www.gpo.gov> (дата обращения: 12.11.2021).

18. Project Plan to Prepare the U. S. Nuclear Regulatory Commission for Efficient and Effective Licensing of Accident Tolerant Fuels, version 1.1. U. S. NRC, October 2019.

19. Supplemental Guidance Regarding the Chromium-Coated Zirconium Alloy Fuel Cladding Accident Tolerant Fuel Concept. U. S. NRC Interim Staff Guidance, ATF-ISG-2019-XX, October 2019.

20. Memorandum of Understanding between U. S. Department of Energy and U. S. Nuclear Regulatory Commission on Nuclear Energy Innovation, MOU-DOE-NRC, 07.10.2019.

21. Fuel Safety Research Plan for Accident Tolerant Fuels, Nuclear Technology Research and Development, U. S. Department of Energy, Idaho National Laboratory, INL/EXT-19-533343, October 2019.

22. В Росатоме начались испытания толерантного топлива для российских и зарубежных легководных реакторов. URL: <https://www.rosatom.ru/journalist/news/v-rosatome-nachalis-ispytaniya-tolerantnogo-topliva-dlya-rossiyskikh-i-zarubezhnykh-legkovodnykh-rea/> (дата обращения: 12.11.2021).

## References

1. Zaimovsky A. S., Nikulina A. V., Reshetnikov N. G. (1981). Cirkonievye splavy v atomnoj energetike [Zirconium alloys in nuclear power industry]. Moscow: Energoizdat [in Russian].

2. Optimized ZIRLO High-performance Fuel Cladding Material. Westinghouse Electric Company, NF-FE-0046, 2016.

3. Zinkle S. J., Terrani K. A., Gehin J. C., Ott L. J., Snead L. L. Accident Tolerant Fuels for LWRs: a Perspective. Journal of Nuclear Materials. 2014, volume 448, issues 1–3.

4. Analysis of Three Mile Island – Unit 2 Accident. Nuclear Safety Analysis Center, Electronic Power Research Institute, NSAC-80-1, NSAC-1, March, 1980.

5. Federal'nye normy i pravila v oblasti ispol'zovaniya atomnoj energii "Obshchiye polozheniya obespecheniya bezopasnosti atomnyh stanciy (OPB AES)" (NP-001-15) [Federal Standards and Rules in the Field of Atomic Energy Use "General provisions for nuclear power plant safety assurance (OPB NPP)" (NP-001-15)]. 2015.

6. State-of-the-Art Report on Light Water Reactor Accident-Tolerant Fuels. Nuclear Energy Agency. Organisation for Economic Co-Operation and Development. NEA Report No. 7317, Nuclear science, 2018.

7. Development of Light Water Reactor Fuels with Enhanced Accident Tolerance, Report to Congress, United States Department of Energy, June 2015.

8. GNF Delivers Accident Tolerant Fuel Assemblies for Plant Installation. URL: <https://www.ge.com/news/press-releases/gnf-delivers-accident-tolerant-fuel-assemblies-plant-installation> (reference date: 12.11.2021).

9. Exelon's Byron 2 Completes First Insertion of Westinghouse Accident-Tolerant Fuel. URL: <https://www.powermag.com/exelons-byron-2-completes-first-insertion-of-westinghouse-accident-tolerant-fuel/> (reference date: 12.11.2021).

10. First European Reactor Loads EnCore Accident Tolerant Fuel. URL: <https://www.world-nuclear-news.org/Articles/First-European-reactor-loads-EnCore-accident-toler> (reference date: 12.11.2021).

11. Vogtle 2 Installs World's First Full Accident-Tolerant Fuel Assemblies. URL: <https://www.powermag.com/vogtle-2-installs-worlds-first-accident-tolerant-nuclear-fuel-assemblies> (reference date: 12.11.2021).

12. Chinese-developed ATF Undergoing Irradiation Tests. URL: <https://www.world-nuclear-news.org/Articles/Chinese-developed-ATF-undergoing-irradiation-tests> (reference date: 12.11.2021).

13. Novikov V. V., Karpyuk L. A., Orlov V. K., Kulakov G. V., etc. (2018). Razrabotka tolerantnogo topliva [Development of tolerant fuel]. NTK-2018 "Yadernoe toplivo novogo pokoleniya dlya AES. Rezul'taty razrabotki, opyt ekspluatatsii i napravleniya razvitiya" (9–10 oktyabrya 2018 g.) – Scientific-technical conference

“NTK-2018 “New Generation Nuclear Fuel for Nuclear Power Plants. Development Results, Operational Experience and Development Directions” (October 9–10, 2018), Sochi [in Russian].

14. Karpyuk L. A., Krasnobaev N. N., Maslov A. A., Novikov V. V., etc. Magnetronnoe napylenie zharostoikikh pokrytii obolochek tolerantnykh tvehlov [Magnetron Sputtering of Heat-Resistant Coatings Claddings of Tolerant Fuel Rods]. Voprosy atomnoj nauki i tekhniki. Ser.: Materialovedenie i novye materialy – Questions of Atomic Science and Technology. Ser.: Materials science and new materials, 2020, no. 5, pp. 4–37 [in Russian].

15. Federal’nye normy i pravila v oblasti ispol’zovaniya atomnoj energii “Pravila yadernoi bezopasnosti reaktornykh ustanovok atomnykh stantsii” (NP-082-07) [Federal Standards and Rules in the Field of Atomic Energy Use “Nuclear Safety Rules for Reactor Facilities of Nuclear Power Plants” (NP-082-07)]. 2007.

16. Federal’nye normy i pravila v oblasti ispol’zovaniya atomnoj energii “Osnovnye trebovaniya k obosnovaniyu prochnosti i termomekhanicheskogo povedeniya teplovydelyayushchikh sborok i teplovydelyayushchikh ehlementov v aktivnoi zone vodo-vodyanykh ehnergeticheskikh reaktorov” (NP-094-15) [Federal Standards and Rules in the Field of Atomic Energy Use “Basic Requirements for Substantiating the Strength and Thermomechanical Behavior of Fuel Assemblies and Fuel Elements in the Core of Pressurized Water Power Reactors” (NP-094-15)]. 2016.

17. Code of Federal Regulations. U. S. Government Publishing Office. URL: <https://www.gpo.gov> (reference date: 12.11.2021).

18. Project Plan to Prepare the U. S. Nuclear Regulatory Commission for Efficient and Effective Licensing of Accident Tolerant Fuels, version 1.1. U. S. NRC, October 2019.

19. Supplemental Guidance Regarding the Chromium-Coated Zirconium Alloy Fuel Cladding Accident Tolerant Fuel Concept. U. S. NRC Interim Staff Guidance, ATF-ISG-2019-XX, October 2019.

20. Memorandum of Understanding between U. S. Department of Energy and U. S. Nuclear Regulatory Commission on Nuclear Energy Innovation, MOU-DOE-NRC, 07.10.2019.

21. Fuel Safety Research Plan for Accident Tolerant Fuels, Nuclear Technology Research and Development, U. S. Department of Energy, Idaho National Laboratory, INL/EXT-19-533343, October 2019.

22. V Rosatome nachalis' ispytaniya tolerantnogo topliva dlya rossijskikh i zarubezhnykh legkovodnykh reaktorov [ROSATOM Starts Testing of Accident Tolerant Fuels for Light Water Reactors]. URL: <https://www.rosatom.ru/journalist/news/v-rosatome-nachalis-ispytaniya-tolerantnogo-topliva-dlya-rossiyskikh-i-zarubezhnykh-legkovodnykh-rea/> (reference date: 12.11.2021).

### Сведения об авторах

*Курындин Антон Владимирович*, руководитель отделения общих проблем 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).

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

*Каримов Азат Зуфарович*, начальник лаборатории безопасности транспортирования радиоактивных материалов, федеральное бюджетное учреждение «Научно-технический центр по ядерной и радиационной безопасности» (107140, Москва, ул. Малая Красносельская, д. 2/8, корп. 5).

*Маковский Сергей Валерьевич*, старший научный сотрудник лаборатории ядерной безопасности неактивных ядерных установок, федеральное бюджетное учреждение «Научно-технический центр по ядерной и радиационной безопасности» (107140, Москва, ул. Малая Красносельская, д. 2/8, корп. 5).

### Authors credentials

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

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

*Karimov Azat Zufarovich*, Head of Laboratory on Safety of Transportation of Radioactive Materials, Scientific and Engineering Centre for Nuclear and Radiation Safety (2/8, building 5, Malaya Krasnoselskaya str., Moscow, 107140), e-mail: karimov@secnrs.ru.

*Makovskiy Sergey Valerievich*, Senior Scientific Researcher, Nuclear Safety Laboratory for Non-Reactor Nuclear Installations, Scientific and Engineering Centre for Nuclear and Radiation Safety (2/8, building 5, Malaya Krasnoselskaya str., Moscow, 107140), e-mail: makovskiy@secnrs.ru.

#### Для цитирования

*Курындин А. В., Куркин А. М., Каримов А. З., Маковский С. В.* О подходах к регулированию безопасности применения толерантного ядерного топлива // Ядерная и радиационная безопасность. 2021. № 4 (102). С. 13–23. DOI: 10.26277/SECNRS.2021.102.4.002.

#### For citation

*Kuryndin A. V., Kirkin A. M., Karimov A. Z., Makovskiy S. V.* On approaches to regulation of accident tolerant fuel application. Nuclear and Radiation Safety, 2021, no. 4 (102), pp. 13–23. DOI: 10.26277/SECNRS.2021.102.4.002 [in Russian].

