

Об условных «сортах безопасности» энергоблоков АЭС РФ

А.И.Аржаев

alex.arj@yandex.ru

ООО «НПО «ДИАПРОК», Москва, Россия

Энергия, полученная на АЭС, считается экологически чистой, поэтому рост количества АЭС неизбежен и в России, и за рубежом. Но память об авариях и инцидентах на АЭС, их причинах и разрушительных последствиях должна заставлять всех ответственных участников процесса следовать базовым принципам глубокоэшелонированной защиты и культуры безопасности. Анализ факторов рассмотренных в статье, указывает, что подход к выполнению принципа культуры безопасности со стороны чиновников Госкорпорации «Росатом» и второй в мире эксплуатирующей организации – АО «Концерн Росэнергоатом» подвержен выхолащиванию в наибольшей степени. Это свидетельствует о том, что уроки прошлых аварий на АЭС не в полной мере усвоены в атомной отрасли РФ и существующий чиновничий нигилизм в отношении выполнения требований федеральных норм и правил требует скорейшего преодоления.

Ключевые слова: атомные станции, атомные энергетические установки, федеральные нормы и правила, дефициты безопасности, оборудование и трубопроводы систем, важных для безопасности, неразрушающий контроль состояния металла, системы неразрушающего контроля, аттестационные испытания систем неразрушающего контроля, концепция течь перед разрушением

On conditional "safety grades" of power units of NPPs of the Russian Federation

A.I. Arjaev

LLC NPO DIAPROK, Moscow, Russia

The energy obtained at nuclear power plants is considered environmentally friendly, so an increase in the number of nuclear power plants is inevitable both in Russia and abroad. But the memory of accidents and incidents at nuclear power plants, their causes and destructive consequences should force all responsible participants in the process to follow the basic principles of defense in depth and safety culture. Analysis of the factors considered in the article indicates that the approach to the implementation of the principle of safety culture on the part of officials of the State Atomic Energy Corporation Rosatom and the world's second operating organization, Rosenergoatom Concern JSC, is subject to emasculation to the greatest extent. This indicates that the lessons of past accidents at nuclear power plants are not fully absorbed in the nuclear industry of the Russian Federation and the existing bureaucratic nihilism in relation to the fulfillment of the requirements of federal norms and rules requires urgent overcoming.

Keywords: nuclear power plants, nuclear power plants, federal norms and rules, safety deficiencies, equipment and pipelines of systems important to safety, non-destructive testing of the state of metal, non-destructive testing systems, certification testing of non-destructive testing systems, the concept of leak before destruction

1. Введение

Термин «сорта безопасности», вынесенный в заголовок, использован для условного ранжирования энергоблоков АЭС РФ по уровню их защищенности от потенциальных инцидентов и аварийных ситуаций и по возможным последствиям.

Недавние публикации [1-2] заставляют задуматься над ответами на вопросы:

- 1) все ли уроки прошлого атомной энергетики в полной мере усвоены в атомной отрасли РФ, отмечающей в 2020 г. 75-ую годовщину?
- 2) будет ли оставлена следующим поколениям действительно безопасная атомная энергетика?

На рисунке 1 показано влияние трех наиболее известных аварий на АЭС на интенсивность сооружения новых блоков АЭС по данным журнала [1], дополненных сведениями за период 1951-1954 гг. согласно официальным данным МАГАТЭ

[3] по срокам сооружения и ввода в эксплуатацию первой в мире АЭС.

Как видно из рисунка 1, определенное снижение активности по сооружению новых блоков АЭС имело место после указанных аварий. Наиболее длительный спад в сооружении новых блоков АЭС был зафиксирован после аварии на блоке № 4 Чернобыльской АЭС. Игнорирование рекомендаций МАГАТЭ по глубокоэшелонированной защите и культуре безопасности со стороны старших менеджеров эксплуатирующих организаций и/или АЭС потенциально грозит катастрофическими последствиями для целой отрасли, как это произошло в Японии (рисунок 2).

На рисунке 3 приведены сведения о причинах окончательного останова реакторов на АЭС. По мнению авторов статьи [2]: «Понимание причин преждевременного окончательного останова реакторов может помочь безопасной длительной эксплуатации действующих АЭС».

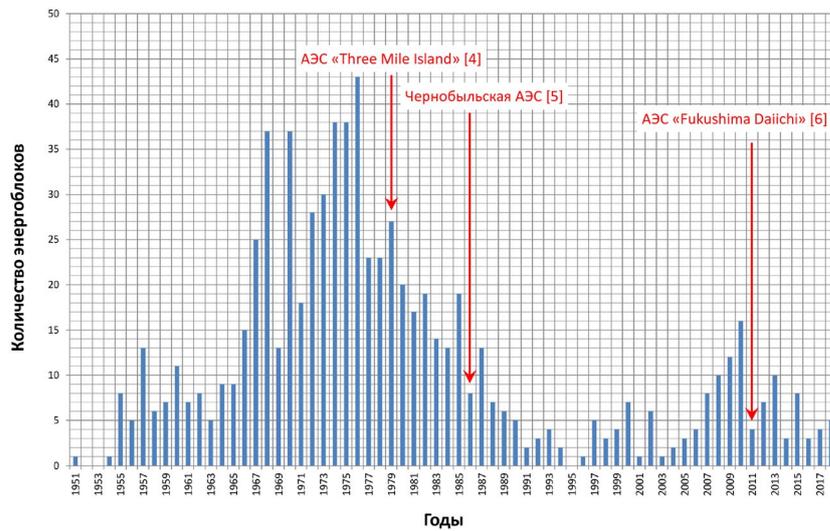


Рисунок 1 – Данные по количеству АЭС, сооружение которых было начато в конкретном году в период 1951-2018 гг.

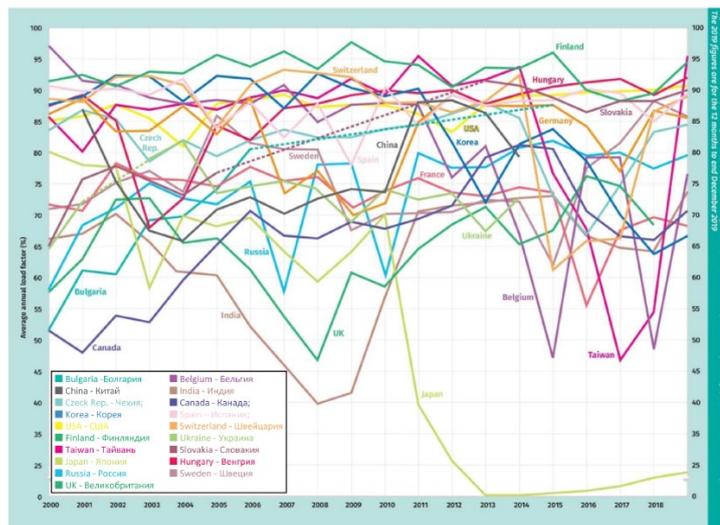


Рисунок 2 – Критические последствия для АЭС Японии после аварии на АЭС «Фукусима» [7]

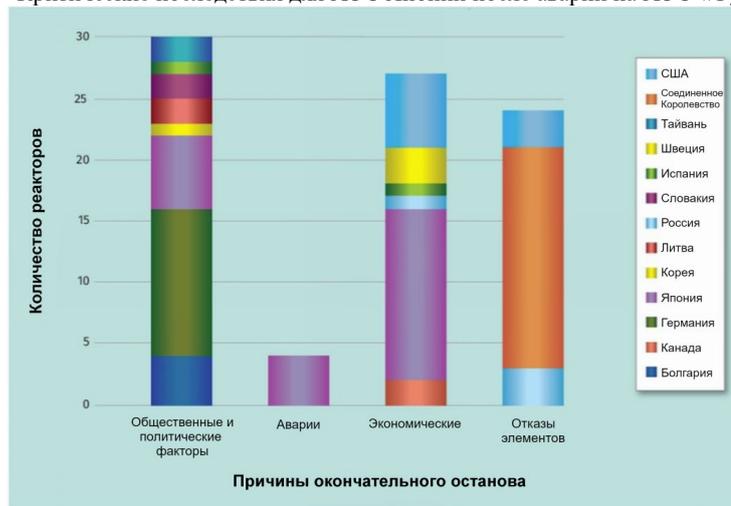


Рисунок 3 – Причины окончательного останова реакторов на АЭС [2]

Представляется, что среди реакторов АЭС, спроектированных в СССР и остановленных по общественным и политическим факторам, следует отметить блок №3 Чернобыльской АЭС (РБМК-1000), блоки №№1 и 2 Игналинской АЭС (РБМК-1500), 6 энергоблоков с реакторами ВВЭР-230 на АЭС «Козлодуй» (Болгария) и АЭС

«Богунце» (Словакия). Останов энергоблоков №№1 и 2 Чернобыльской АЭС после пожара в машинном зале, скорее всего, обусловлен экономическими факторами.

Однако небольшой разброс по трем из четырех столбцов на рисунке 3 – от 24 до 30 случаев – показывает существенный вклад отказов элемен-

тов в принятие решения об окончательном оставлении реактора. Поэтому предупреждение отказов систем, конструкций и элементов АЭС с применением технических средств контроля фактического состояния, как правило, имеет преимущество перед ликвидацией последствий отказов.

2. Ренессанс в атомной отрасли России в 2000-2020 гг.

После продления сроков эксплуатации (ПСЭ) блоков первого поколения АЭС [8-10] более 15 лет назад было начато массовое ПСЭ действующих

сих блоков АЭС на дополнительный срок в 10-15 лет (таблица 1).

Достигнутые успехи позволили перейти на ПСЭ блоков АЭС с реакторами ВВЭР на дополнительный срок в 30 лет [12], в том числе, суммарно в рамках повторного ПСЭ согласно НП-017-18 [13] (таблицы 2 и 3).

Таблица 1 – Состояние работ по ПСЭ блоков АЭС на 2014 г. [11]

АЭС	Блок №1	Блок №2	Блок №3	Блок №4	Блок №5
Ленинградская	РБМК-1000	РБМК-1000	РБМК-1000	РБМК-1000	
Курская	РБМК-1000	РБМК-1000	РБМК-1000	РБМК-1000	
Билибинская	ЭГП-6	ЭГП-6	ЭГП-6	ЭГП-6	
Белоярская			БН-600		
Кольская	ВВЭР-440	ВВЭР-440	ВВЭР-440	ВВЭР-440	
Нововоронежская			ВВЭР-440	ВВЭР-440	ВВЭР-1000
Смоленская	РБМК-1000	РБМК-1000	РБМК-1000		
Балаковская	ВВЭР-1000	ВВЭР-1000	ВВЭР-1000	ВВЭР-1000	
Калининская	ВВЭР-1000	ВВЭР-1000			

(белый фон ячейки - работы по ПСЭ выполнены; серый фон ячейки – работы по ПСЭ ведутся)

Таблица 2 – Дорожная карта первичного ПСЭ энергоблоков АЭС [12]

2БАЛ ВВЭР- 1000	3БАЛ ВВЭР- 1000	3СМО ВВЭР- 1000					4БАЛ ВВЭР- 1000				
2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	
Блок АЭС		Тип реактора		Завершение НСЭ, год		Планируемый год завершения ДСЭ					
3БАЛ		ВВЭР-1000		2018		2048					
4БАЛ		ВВЭР-1000		2023		2053					
3СМО		РБМК-1000		2019		2034					

Таблица 3 – Повторное ПСЭ энергоблоков АЭС [12]

Блок АЭС	Завершение первого ДСЭ	Планируемый срок второго ДСЭ	Текущее состояние работ
4НВО	2017	2032	1. Расширение спектра проектных аварий с Ду 100 до Ду500 (разрыв главного циркуляционного трубопровода (ГЦТ)) за счет:
1КОЛ	2018	2033	• внедрения пассивной системы охлаждения активной зоны (4 гермоемкости САОЗ);
2КОЛ	2019	2034	• модернизации САОЗ высокого и низкого давления; модернизации герметичного объема (ГО) РУ для обеспечения его целостности при максимальной проектной аварии (МПА).
			2. Продление срока эксплуатации незаменяемого оборудования, зданий и сооружений с учетом:
			• проведения отжига корпуса реактора;
			• внедрения системы подогрева воды в кольцевом баке.
2,3БИЛ	2019-2020	2021	• разработка технологии, изготовление робототехнического комплекса и отбор проб из нижней опорной плиты (НП) и бака биологической защиты (ББЗ) реакторной установки;
			• исследование свойств металла, обоснование остаточного ресурса незаменяемых элементов РУ (НП, ББЗ)

Главной особенностью технической политики отрасли [12-14] стало сооружение и ввод в эксплуатацию новых энергоблоков АЭС с реакторами ВВЭР-1000/1200 (рисунок 4), наряду с по-

вторным ПСЭ блоков №№ 2 и 3 Билибинской АЭС.

Также в АО «Концерн Росэнергоатом» осуществляется Программа по увеличению выработки электроэнергии на действующих энергоблоках

АЭС и переводу ВВЭР-1000 на 107% Nном до

2022 г. [14].

1БАЛ		1БИЛ	1КЛН	1КОЛ	1КУР	1ЛЕН		1РСТ	1СМО
2БАЛ		2БИЛ	2КЛН	2КОЛ	2КУР	2ЛЕН		2РСТ	2СМО
3БАЛ	3БЕЛ	3БИЛ	3КЛН	3КОЛ	3КУР	3ЛЕН	4НВО	3РСТ	3СМО
4БАЛ	4БЕЛ	4БИЛ	4КЛН	4КОЛ	4КУР	4ЛЕН	5НВО		
							6НВО		

а)

4РСТ ВВЭР-1000									
5ЛЕН ВВЭР-1200	7НВО ВВЭР-1200	6ЛЕН ВВЭР-1200		1КУР-2 ВВЭР-ТОИ	2КУР-2 ВВЭР-ТОИ	7ЛЕН ВВЭР-1200	8ЛЕН ВВЭР-1200		1СМО-2 ВВЭР-ТОИ
2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027

б)

Рисунок 4 – Состояние работ по ПСЭ и развитию генерирующих мощностей: а) новые блоки АЭС на 2017 г. – жирная рамка; завершённые работы по ПСЭ – белый фон; ПСЭ в процессе выполнения – серый фон [14]; б) ввод новых энергоблоков АЭС [12].

3. Актуализация нормативного обеспечения атомной отрасли РФ

За период с 2015 г. существенно обновлена нормативная база на уровне федеральных норм и

правил в области использования атомной энергии (ФНП), имеющих отношение к оборудованию и трубопроводам АЭС и атомных энергетических установок - АЭУ (таблица 4).

Таблица 4 – Обновление нормативная база на уровне ФНП

ПНАЭ Г-7-008-89 [15]	АЭУ	НП-089-15 [16]	АЭУ
		НП-089-15 [17] (ред. от 19.11.2019)	
-		НП-084-15* [18]	АС
ПНАЭ Г-7-009-89 [19]	АЭУ	НП-104-18* [20]	АЭУ
ПНАЭ Г-7-010-89 [21]	АЭУ	НП-105-18* [22]	АЭУ
ПНАЭ Г-7-002-86 [23]	АЭУ	разработка [24]	АЭУ
ОПБ-88/97 ** [25]	АС	НП-001-15 [26]	АС
ПНАЭ Г-1-024-90 [27]	АС	НП-082-07 [28]	АС
ПНАЭ Г-01-036-95 [29]	АС с ВВЭР	НП-006-16 [30]	АС с ВВЭР
-		НП-096-15* [31]	АС
НП-017-2000 [32]	АС	НП-017-18 [12]	АС
-		НП-071-18* [33] (ред. от 05.04.2018)	***
НП-071-06 [34]	ОИАЭ	НП-071-06 [35] (с изм. от 16.03.2018)	ОИАЭ

Примечание:

* – имеется в явном виде ссылка на документ в НП-089-15 [17];

** – НП-001-97 (ПНАЭ Г-01-011-97);

*** – продукция и процессы в области использования атомной энергии.

Первое, что обращает на себя внимание в таблице 4, это определенное «размыывание» стройной системы ФНП [15, 19, 21, 23], ориентированной на АЭУ за счет:

- во-первых, замены документа [15] на два, один из которых кроме АС распространяется и на другие элементы АС - [18];

- во-вторых, за счет введения прямых ссылок в НП-089-15 [17] на документы для АЭС [31] и для продукции и процессов в области использования атомной энергии в целом - [33].

При этом традиционное наполнение термина «оборудование» в [15-17] никак не соотносится с более глобальным наполнением того же термина в [31].

Указание в пунктах 141 и 149 НП-089-15 [17], что термин «ресурсные характеристики» (определенный в [31]) относится исключительно к оборудованию и трубопроводам АЭУ, подведомственным [31], является корректным лишь частично. В начале документа [17] в пункте 14 термин «ресурсные характеристики» распространен на все трубопроводы и оборудование АЭУ: «Срок служ-

бы и ресурсные характеристики оборудования и трубопроводов устанавливаются разработчиком и должны быть указаны в проектной или конструкторской документации».

Кажущаяся простота решений 2015 г. по совершенствованию нормативной базы атомной отрасли в итоге оборачивается терминологической путаницей и отказом от общепринятых и понятных требований обеспечения прочности, надежности, работоспособности и безопасности эксплуатации оборудования и трубопроводов АЭУ в [15] на искусственное требование об установлении «ресурсных характеристик» указанных элементов в проектной или конструкторской документации.

Главным же недостатком активного реформирования нормативной базы в 2015 г. (таблица 4) стало нарушение преемственности в ее развитии. Это в существенной степени затруднило демонстрацию зарубежным заказчикам референтности предлагаемых к сооружению новых АЭС ввиду того, что контрактная документация включала ранее действовавшие нормативные документы

[15, 19, 21], преемственность которым в документах [16-18, 20, 22] нарушена.

Среди позитивных изменений в новых ФНП (таблица 1) следует выделить:

- требование о применении концепции течь перед разрушением (ТПР) к контуру теплоносителя реактора (п.3.3.3 [26]);

- требование об оценке соответствия систем неразрушающего контроля (НК) состояния металла оборудования и трубопроводов АЭС (п.61 [18]).

Последнее изменение в сочетании с определением термина «система неразрушающего контроля» в пунктах 58 и 61 документа [18] гармонизировано с устоявшимися терминами, принятыми в документах МАГАТЭ [36] и системы ENIQ [37-38], что можно отметить, как успех Госкорпорации «Росатом», способствующий продвижению АЭС российского проектирования на международный рынок.

Оценка соответствия является одной из составляющих системы технического регулирования Госкорпорации «Росатом» (рисунок 5).



* - приоритет требований по безопасности, установленных в федеральных нормах и правилах в области использования атомной энергии (ФНП), для элементов 1-3 классов безопасности

Рисунок 5 – Отраслевая система технического регулирования в Госкорпорации «Росатом»

4. О дефицитах оценки соответствия систем НК для АЭС РФ

В Постановлениях Правительства РФ (далее – ПП РФ) [39-42] было отмечено обязательное соблюдение требований документов ФНП в работах в области технического регулирования Госкорпорации «Росатом».

Однако национальный стандарт ГОСТ Р 50.04.07-2018 [43] по оценке соответствия систем НК состояния металла оборудования и трубопроводов АЭС в форме аттестационных испытаний на выходе из ТК322 имел редакцию, нарушающую требования ФНП [18] и положения основополагающего ГОСТ Р 1.2 [44]. Попытки приостановить в сентябре 2018 г. практическое использо-

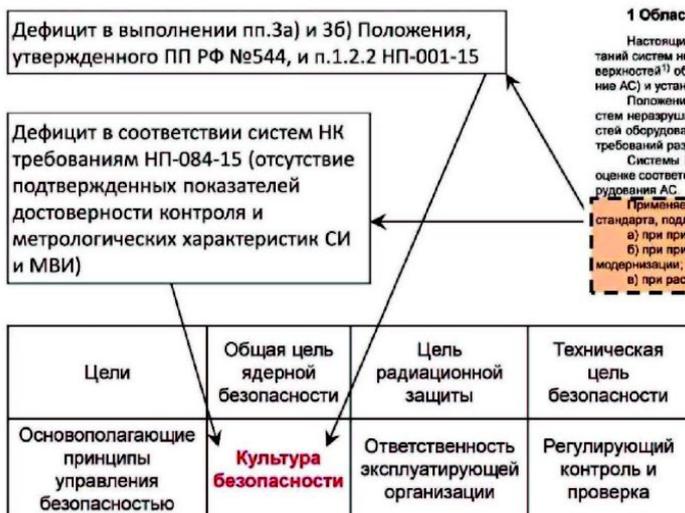
вание национального стандарта [43] для проведения аттестационных испытаний систем НК (к тому же в отсутствие национального стандарта [45] по метрологическим требованиям, на который имелась ссылка в [43]) привели к абсурдному результату [46]: вместо срочного исправления в стандарте [43] отступлений от ФНП [18] рабочая группа ТК322, не имея полномочий на пересмотр требований ФНП, большинством голосов поддержала дальнейшее применение изначально некорректного стандарта при проведении аттестационных испытаний систем НК, что негативно характеризует деятельность руководства ТК322 в обеспечении приоритета требований ФНП (таблица 4), являющихся нормативно-правовыми ак-

тами согласно Статье 6 федерального закона N170-ФЗ (рисунок 5).

В стандарте [43] не предусмотрена оценка соответствия «применяемых систем НК», что не соответствует требованиям нормативно-

правового акта [18] ввиду отсутствия в нем подобно термина. Комментарии к этим неправомерным изменениям (рисунок 5) даны на рисунке 6 [47] со ссылкой на документ МАГАТЭ ИНСАГ-12 [48].

ГОСТ Р 50.04.07-2018 - как индикатор уровня культуры безопасности



ИНСАГ-12 (МАГАТЭ), стр.9, рис.1

Рисунок 6 – Оценка фактического нарушения требований нормативно-правового акта НП-084-15 [18] со стороны ТК322 [47]

Некорректность положений раздела 1 ГОСТ Р 50.04.07-2018 [43] очевидна из требований ФНП [31], в котором средства и методики НК в составе системы НК отнесены к продукции, включенной в пункт 3 [31], а сами системы НК включены в пункт 2 [31] в соответствии с записью в пункте 61 ФНП [18]: «Системы неразрушающего контроля (средства контроля, методики контроля, персонал, выполняющий контроль) подлежат оценке соответствия».

Элементарная логика подсказывает, что для того, чтобы иметь уверенность в качестве продукции – оборудования и трубопроводов АЭУ/АЭС – необходима тщательная предварительная оценка соответствия самих систем НК согласно требованиям пунктов 62-62 ФНП [18].

До введения в действие ФНП [18] были проведены испытания применяемых на АЭС методик НК совместно со средствами контроля согласно действовавшим в этот период документам [49-50].

В соответствии с ПП РФ №544 [41] было необходимо провести оценку соответствия уже систем НК, в составе которых были использованные допущенные к применению на АЭС методики НК, для проверки, в первую очередь, персонала АЭС и специализированных организаций, привлекаемых к проведению эксплуатационного не-

ГОСТ Р 50.04.07—2018

НАЦИОНАЛЬНЫЙ СТАНДАРТ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Система оценки соответствия в области использования атомной энергии

ОЦЕНКА СООТВЕТСТВИЯ В ФОРМЕ ИСПЫТАНИЙ

Аттестационные испытания систем неразрушающего контроля

Conformity assessment system for the nuclear power use. Conformity assessment in the form of tests. Qualification tests of non-destructive inspection systems

Дата введения — 2018—03—15

1 Область применения

Настоящий стандарт распространяется на оценку соответствия в форме аттестационных испытаний систем неразрушающего контроля основного металла, сварных соединений и наплавленных поверхностей¹⁾ оборудования, трубопроводов и других элементов атомных станций²⁾ (далее оборудование АС) и устанавливает порядок ее проведения.

Положения настоящего стандарта могут быть использованы для целей оценки соответствия систем неразрушающего контроля основного металла, сварных соединений и наплавленных поверхностей оборудования и трубопроводов исследовательских ядерных установок при условии выполнения требований раздела 7 [1].

Системы НК, разработанные после введения в действие для настоящего стандарта, подлежат оценке соответствия в форме аттестационных испытаний до их применения для контроля металла оборудования АС.

Применяемые системы НК, прошедшие оценку соответствия до введения в действие настоящего стандарта, подлежат оценке соответствия в следующих случаях:

- а) при применении в системе НК впервые разработанной методики НК;
- б) при применении в системе НК впервые разработанных и изготовленных средств НК или при их модернизации;
- в) при расширении области распространения методики НК (новые объекты или зоны контроля).

Этот стандарт надо срочно приводить в соответствие с НП-084-15

разрушающего контроля на АЭС согласно ФНП [18].

В период разработки национального стандарта по оценке соответствия систем НК был подготовлен в инициативном порядке научно-технический отчет [51], направленный в середине декабря 2017 г. в адреса Госкорпорации «Росатом», Ростехнадзора и эксплуатирующей организации АО «Концерн Росэнергоатом».

Таким образом, оказалось, что дефицит безопасности был заложен ТК322 в ГОСТ Р 50.04.07-2018 [43] для всех АЭС РФ, в том числе, действующих и новых энергоблоков серии «АЭС-2006». В период сооружения всех АЭС с ректорами ВВЭР-1200, ввода их в эксплуатацию и эксплуатации для оборудования и трубопроводов 1-3 классов безопасности согласно ФНП [26] применяются системы НК, не прошедшие оценку соответствия и не имеющие подтверждения показателей достоверности НК согласно требованиям ФНП [18].

5. О дефицитах применения концепции ТПР на АЭС РФ

Дефицит безопасности АЭС РФ в ГОСТ Р 50.04.07-2018 [43] оказался не единственным

негативным следствием процесса стандартизации под руководством ТК322.

Так для выполнения требования пункта 3.3.3 ФНП [26] был разработан национальный стандарт ГОСТ Р 58328-2018 [52] по применению концепции ТПР к трубопроводам АЭС, который не вернул отрасли тот же уровень адекватности в применении концепции ТПР на основании руководящего документа Минатома РФ [53], гармонизи-

рованного с зарубежной нормативной практикой (рисунок 7) и в частности, с подходами в США и Германии [54-55]. Последнее обстоятельство давало российским проектам АЭС поддержку в продвижении на зарубежные рынки, так как концепция ТПР всегда рассматривалась как концепция безопасности ответственных трубопроводов АЭС.

Хронология развития методологии и нормативных подходов обеспечения конструкционной целостности

Дата	Событие	Выпуск/отмена НД в РФ
1974	Базовая Концепция Безопасности (Германия)	
1984.02	U.S. NRC. Generic Letter 84-04	
1984.08	Monterey, California, CNSI Specialist Meeting on LBB	
1984.11	U.S. NRC. Evaluation of Potential for Pipe Breaks NUREG-1061	
1985.10	LBB Seminar: Columbus, Ohio, NUREG/CP-0077 (published 07.1986)	
1987.05	LBB Seminar: Tokyo, Japan, NUREG/CP-0092, published 03/1988	
1987.08	Standard Review Plan 3.6.3 Leak-Before-Break Evaluation Procedure	
1989.05	LBB Seminar: Taipei, Taiwan NUREG/CP-0109 (published 02.1990)	
1989.10	LBB Seminar: Toronto, Canada, Proceedings published in 1990	
1993	IAEA TECDOC-710	М-ТПР-01-93
1994	IAEA TECDOC-774	
1995.10	Seminar on Leak-Before-Break in Reactor Piping and Vessels, October 9-11, 1995, Lyon, France // NUREG/CP-0155.1995.	
1998	EUR 17574 EN	
1999		РД 95 10547-99
2000	EUR 18549 EN	
2001	SMIRT-16 (Семинар по ТПР)	
2002	IAEA EPB 2000-2002 (Final Report on IGSCC at Du300 RBMK)	
2003	SMIRT-17 (доклады по ТПР)	РД ЭО 0513-03
2005	SMIRT-18 (доклады по ТПР)	
2007	SRP 3.6.3 (Rev.1, 03.2007), SMIRT-19 (доклады по ТПР)	
2009	SMIRT-20; начало программы xLPR	
2010		РД ЭО 1.1.2.05.0842-2010
2011	SMIRT-21 (доклады по ТПР)	
2013	SMIRT-22 (доклады по ТПР)	РД ЭО 1.1.2.05.0939-2013 (отмена РД 95 10547-99)
2014-2015	КТА 32-6 (11.2014), SMIRT-23 (доклады по ТПР)	РД ЭО 1.1.2.05.0939-2013 (до 12.2016)
2016	SMIRT-24 (доклады по ТПР)	РД ЭО 1.1.2.05.0939-2016
2018		ГОСТ Р 58328-2018

АКТУАЛИЗАЦИЯ

Рисунок 7 – Хронология развития подходов обеспечения конструкционной целостности оборудования и трубопроводов АЭС [56]

Национальный стандарт ГОСТ Р 58328-2018 [52] отошел от стройного методического подхода, заложенного в [53], как и все промежуточные документы эксплуатирующей организации [57-58]. Распространение концепции ТПР в [52] на трубопроводы Ду300 контура теплоносителя РБМК-1000 с повреждениями по механизму межкристаллитного коррозионного растрескивания под напряжением (МКРПН) – это существенный проигрыш российской нормативной базы по применению концепции ТПР. В итоговом отчете внебюджетной программы МАГАТЭ [59] было отмечено, что без замены материала трубопроводов на материал, стойкий к повреждению по механизму МКРПН, классическая концепция ТПР к ним неприменима.

Образцом документа по применению концепции конструкционной целостности и к трубопроводам, и оборудованию (сосудам, корпусам насосов и трубопроводной арматуры) является стандарт КТА-3206 [60], последовательные положения которого рекомендуют учесть при дальнейшем развитии нормативной базы для трубопроводов и оборудования АЭС РФ.

В отчете [61], подготовленном в инициативном порядке в рамках разработки стандарта по применению концепции ТПР и направленном в сентябрь 2018 г. в адреса предприятий проектно-

конструкторского блока Госкорпорации «Росатом», были отмечены дефициты применения концепции ТПР для энергоблоков АЭС разных поколений: ВВЭР-440, ВВЭР-1000, ВВЭР-1200 и РБМК-1000. Дефициты применения концепции ТПР для энергоблоков Билибинской АЭС с реакторами ЭГП-6 на порядки меньше дефицитов для АЭС с РБМК-1000, поэтому в отчете [61] отдельно не рассматривались.

Реакторные установки РБМК-1000 и ЭГП-6 имеют несоответствия требованиям пункта 21 НП-010-16 [62], что повышает актуальность применения на указанных энергоблоках положений ГОСТ Р 58328-2018 [52], в котором записано, что «5.1.1 Применение концепции ТПР для трубопроводов контура теплоносителя реактора, проектируемых, сооружаемых и действующих, блоков АС, обусловлено требованиями [1] /ред.- [26]/ (пункты 3.3.3, 3.4.3.2), [2] /ред.- [28]/ (пункт 2.5.13), [3] /ред.- [16]/ (пункт 52), а также необходимостью компенсации отсутствия герметичного ограждения РУ на блоках АС, имеющих отклонения от требований [4] /ред.- [62]/ (пункт 21)». На ноябрь 2020 г. пункт 52 исключен из НП-089-15 в действующей редакции [17].

Обязательные требования национального стандарта ГОСТ Р 58328-2018 [52] пункта 1.2 и обязательного Приложения А не выполнены в

полной мере на всех энергоблоках АЭС РФ, что показано в отчете [61] и в презентации доклада [56], представленной в рамках семинара Госкорпорации «Росатом» в период 4-6 июня 2019 г. [63].

В отчете [61] главным дефицитом применения концепции ТПР в соответствии с разрабатываемым национальным стандартом (будущим стандартом [52]) было названо отсутствие на всех АЭС РФ систем НК, прошедших оценку соответствия в форме аттестационных испытаний согласно требованиям нормативно-правового акта [18] и стандарта [43]. Эта ситуация существует в полной мере и на конец 2020 г., что не позволяет каким-либо образом надежно прогнозировать остаточную дефектность после проведения эксплуатационного НК, в особенности для корпусных деталей оборудования в составе контуров теплоносителя реакторов ВВЭР-440 и ВВЭР-1000, изготовленных из отливок [61]. По своей сути отсутствие на всех АЭС РФ аттестованных систем НК - это дефицит глубокоэшелонированной защиты.

В рамках применения концепции ТПР неоспорим приоритет раннего выявления возможного отказа, что и обеспечивает применение на АЭС аттестованных систем НК. Поэтому сомнителен акцент в пункте 3.3.3 ФНП [26] на наличие системы контроля течи (СКТ) в качестве основного инструмента применения на АЭС концепции ТПР. Это существенное методическое отставание от рекомендаций МАГАТЭ в пункте

6.14 документов 2012 и 2016 гг. [64-65], которое целесообразно устранить при очередном пересмотре ФНП [26].

6. Об условных «сортах безопасности» АЭС

Для сооружения АЭС «Ханхикиви» (Финляндия) потребовалась доработка ГЦНА контура теплоносителя реактора с заменой материала корпуса на сталь той же марки, из которой изготовлены трубопроводы Ду850 [61], чтобы устранить в проектом решении разнородное сварное соединение, заваренное электродом марки ЦЛ-51 с пониженными характеристиками трещиностойкости, что будет отличием указанного проекта от проектов, реализованных в России на энергоблоках АЭС с реакторами ВВЭР-1000 и ВВЭР-1200.

Это дает основания рассматривать будущий энергоблок АЭС «Ханхикиви» в качестве эталона при экспертной оценке «сортности» энергоблоков АЭС советского и российского проектирования (рисунок 8).

Из рисунка 8 представляется очевидной логика приоритетного устранения отмеченных выше дефицитов (разделы 4 и 5), начиная с наиболее уязвимых энергоблоков АЭС РФ, отнесенных к более низким «сортам безопасности», что могло бы способствовать повышению уровня безопасности более уязвимых блоков, некоторые из которых по результатам ПСЭ претендуют на срок эксплуатации в 60 лет (таблица 3).

Тип РУ	Статус систем НК /НП-084-15/	Наличие ГО РУ /НП-010-16/	Наличие композитных СС в первом контуре	Наличие оборудования из отливок в первом контуре	«Сорт безопасности»
Энергоблоки АЭС с РУ большой мощности					
ВВЭР-1200 (Ханхикиви)	аттестована ¹⁾	есть	нет	нет	высший
ВВЭР-1200	не аттестована	есть	есть	нет	первый
ВВЭР-1000	не аттестована	есть	есть	есть	второй
РБМК-1000 (2 оч.)	не аттестована	нет ²⁾	есть	нет	третий
РБМК-1000 (1 оч.)	не аттестована	нет ³⁾	есть	нет	четвертый
Энергоблоки АЭС с РУ средней мощности					
ВВЭР-440/213	не аттестована	есть	есть ⁴⁾	есть	третий ⁵⁾
ВВЭР-440/230	не аттестована	нет	есть ⁴⁾	есть	четвертый ⁶⁾
Энергоблоки АЭС с РУ малой мощности					
ЭГП-6	не аттестована	нет	нет сведений	нет	третий ⁷⁾

¹⁾- требование STUK согласно YVL E.5; ²⁾- ПА: разрыв Ду900; ³⁾- ПА: разрыв Ду300; ⁴⁾- «СС №23» - необходим ремонт: иначе склонность к МКРПН; ⁵⁾ - второй «сорт» после ремонта «СС №23»; ⁶⁾ третий «сорт» после ремонта «СС №23»; ⁷⁾ - реактор ЭГП-6 имеет свойство самозащитности при разрывах контура теплоносителя реактора.

Рисунок 8 - Условные «сорты безопасности» блоков АЭС советского и российского проектирования

На практике же устранение главного дефицита согласно отчетам [51, 61] путем аттестации систем НК не запланировано в атомной отрасли РФ для энергоблоков, отнесенных условно к второму-четвертому «сортам безопасности».

Проводимые аттестационные испытания систем НК, включенных в проекты АЭС с ВВЭР-1200 Новоронежской АЭС-2 и Ленинградской АЭС-2 [66], Белорусской АЭС [67] и Курской АЭС-2 [68], проводятся на специально изготовленных испытательных образцах [69], но в отсут-

ствие технических требований к системам НК согласно пункту 58 ФНП [18], как было указано еще в 2018 г. [70]. Поэтому шансы этих блоков АЭС попасть на верхнюю строку на рисунке 8 еще долго будут оставаться низкими.

Из рисунка 8 следует, что планируемый к сооружению за рубежом по российскому проекту блок АЭС «Ханхикиви», по видимому, сможет претендовать на образцовость взамен энергоблоков серии «АЭС-2006» на территории РФ.

Этот успех отечественного реакторостроения за пределами РФ вызывал бы позитивную реакцию, если бы в отрасли были предприняты решительные и безотлагательные меры по выполнению на энергоблоках первых поколений АЭС (рисунок 8) требований пункта 61 НП-084-15 [18], которые за пятилетие действия указанных ФНП даже не попали в планы отрасли. Демонстрация подхода к старым энергоблокам АЭС РФ по принципу «естественного выбывания» лишь подчеркивает существенный дефицит такого понятия как культура безопасности и в Госкорпорации «Росатом», и в Центральном аппарате эксплуатирующей организации, как было отмечено на рисунке 6 [47].

Остается только надеяться, что отсутствие эффективного неразрушающего контроля оборудования трубопроводов на АЭС РФ, отвечающего задачам, поставленным в ПП РФ №544, не станет причиной серьезной аварии, как это случилось в г.Норильске в мае 2020 г. [71].

7. Заключение

Авария в Норильске – это предупреждение всем потенциально техногенноопасным производствам, в том числе, и атомной отрасли РФ, что цена своевременных предупредительных мер, включая контроль технического состояния оборудования трубопроводов на АЭС РФ, может оказаться на порядки дешевле устранения последствий инцидентов и аварий.

Ренессанс с бурным развитием атомной энергетики РФ, описанный в начале статьи, нуждается в подкреплении срочными адекватными техническими и организационными мероприятиями на АЭС РФ по выполнению действующих ФНП, призванных обеспечить надежные гарантии безопасности атомной энергетики.

Поэтому вместо оптимистичного вывода об усвоении уроков прошлого (рисунок 1) в атомной отрасли РФ хочется высказать пожелание, чтобы описанные дефициты глубокоэшелнированной защиты и культуры безопасности начали решительно устранять хотя бы к 76-ой годовщине отрасли.

Благодарность

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта 19-07-00445.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] NEI. The lingering ghost of Chernobyl. 9 July 2019. <https://www.neimagazine.com/features/featureth-e-lingering-ghost-of-chernobyl-7304114/>
- [2] IAEA. Nuclear Power Reactors in the World. Reference Data Series No.2. 2020.
- [3] A. Rising, J. Lindberg. Nuclear delivers a stronger tomorrow // Nuclear Engineering international, September 2020.
- [4] Аварии и инциденты на атомных электростанциях. Учебное пособие под общей редакцией д.ф.-м.н., профессора С.П.Соловьева. Обнинск, ИАТЭ, 1992, 300 с.
- [5] Канальный ядерный энергетический реактор РБМК / Под общ. ред. Ю.М. Черкашова; отв. ред. Ю.М. Никитин, И.А. Стенбок. Глава 13 - Москва: ГУП НИКИЭТ, 2006 (Люберцы (Моск. обл.): ПИК ВИНТИ). - 631 с.
- [6] Т. Нарабаяси (Т. NARABAYASHI). Использование опыта, полученного после аварии на АЭС «ФУКУСИМА-ДАЙИЧИ», для обеспечения безопасности АЭС во всем мире // Труды 8-ой международной научно-технической конференции «Безопасность, эффективность и экономика атомной энергетики» (МНТК-2012), 23–25 мая 2012, Москва, Россия.
- [7] Nuclear Engineering International, vol.65, No.791 (May 2020), p.39 <https://secure.viewer.zmags.com/publication/4d4161a2#4d4161a2/36>
- [8] А.И. Аржаев, С.В. Европин, В.А. Киселев, В.О. Маханев, А.А. Петров, А.А. Потапов, В.А. Савченко, Г.Н. Сапрыкин. Обеспечение безопасной эксплуатации элементов КМПЦ энергоблоков АЭС с реакторами РБМК-1000 на базе концепции «исключение разрывов» (IAEA-CN-114--21p) // Доклад на Международной конференции МАГАТЭ «50 лет атомной энергетике», 28 июня – 2 июля 2004, Обнинск, Россия.
- [9] A. Arzhaev, V. Baldin, S. Evropin, A. Ekimovski, A. Petrov, V. Savchenko, G. Saprykine. Main results of life extension concept application at LNPP Unit 1 // International Journal of Nuclear Energy Science and Technology, No 1(4), pp.274-279 (2005).
- [10] Викин В.А., Жбанников В.В., Прытков А.Н., Сливкин М.П. Оценка состояния металла и сварных соединений оборудования и трубопроводов I контура РУ ВВЭР440 I поколения в период сверх проектного срока эксплуатации Нововоронежской АЭС // Труды 10-ой Международная конференция «Проблемы материаловедения при проектировании, изготовлении и эксплуатации оборудования АЭС», 7-9 октября 2008, Санкт-Петербург, Россия.
- [11] В.Г. Асмолов Обеспечение безопасности и повышение эффективности атомной энергетики России // Сообщение на пленарном заседании 9-ой международной научно-

- технической конференции «Безопасность, эффективность и экономика атомной энергетики» (МНТК-2014), 23-24 мая, 2014, Москва, Россия.
- [12] А.В. Шутиков. Ближнесрочные планы Концерна по реализации стратегии развития ядерной энергетики // // Сообщение на пленарном заседании 11-ой международной научно-технической конференции «Безопасность, эффективность и экономика атомной энергетики» (МНТК-2018), 23-24 мая, 2018, Москва, Россия.
- [13] НП-017-18. Основные требования к продлению срока эксплуатации блока атомной станции. <http://docs.cntd.ru/document/542622324>
- [14] Шутиков А.В. Роль АО ОКБ «Гидропресс» в решении основных задач АО «Концерн Росэнергоатом» // 10-я Международная научно-техническая конференция «Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР» (МНТК-2017), 16-19 мая 2017, Подольск, Россия.
- [15] ПНАЭ Г-7-008-89. Правила устройства и безопасной эксплуатации оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. <http://docs.cntd.ru/document/1200044519>
- [16] НП-089-15. Правила устройства и безопасной эксплуатации оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. 2015.
- [17] НП-089-15 (ред. от 19.11.2019). Правила устройства и безопасной эксплуатации оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. <http://docs.cntd.ru/document/420329010>
- [18] НП-084-15. Правила контроля основного металла, сварных соединений и наплавленных поверхностей при эксплуатации оборудования, трубопроводов и других элементов атомных станций. <http://docs.cntd.ru/document/420324294>
- [19] ПНАЭ Г-7-009-89. Оборудование и трубопроводы атомных энергетических установок. Сварка и наплавка. Основные положения (с Изменением N 1). <http://docs.cntd.ru/document/1200036947>
- [20] НП-104-18. Сварка и наплавка оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. <http://docs.cntd.ru/document/551789830>
- [21] ПНАЭ Г-7-010-89. Оборудование и трубопроводы атомных энергетических установок. Сварные соединения и наплавки. Правила контроля. <http://docs.cntd.ru/document/1200036948>
- [22] НП-105-18. Правила контроля металла оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок при изготовлении и монтаже. <http://docs.cntd.ru/document/551789828>
- [23] ПНАЭ Г-7-002-86. Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. <http://docs.cntd.ru/document/1200037730> и <http://docs.cntd.ru/document/1200042824>
- [24] Закупка №161013/0513/1736. Право заключения договора на Пересмотр федеральных норм и правил «Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок» ПНАЭГ-7-002-86. <http://www.zakupki.rosatom.ru/16101305131736>.
- [25] НП-001-97 (ПНАЭ Г-01-011-97). Общие положения обеспечения безопасности атомных станций ОПБ-88/97. <http://docs.cntd.ru/document/1200048646>
- [26] НП-001-15. Общие положения обеспечения безопасности атомных станций. <http://docs.cntd.ru/document/420329007>
- [27] ПНАЭ Г-1-024-90. Правила ядерной безопасности реакторных установок атомных станций (ПБЯ РУ АС-89). <https://files.stroyinf.ru/Data1/8/8262/index.htm>
- [28] НП-082-07. Правила ядерной безопасности реакторных установок атомных станций. <http://docs.cntd.ru/document/902083695>
- [29] ПНАЭ Г-01-036-95 (НП-006-98). Требования к содержанию отчета по обоснованию безопасности АС с реакторами типа ВВЭР. <http://docs.cntd.ru/document/1200054204>
- [30] НП-006-16. Требования к содержанию отчета по обоснованию безопасности блока атомной станции с реактором типа ВВЭР. <http://docs.cntd.ru/document/456052890>
- [31] НП-096-15. Требования к управлению ресурсом оборудования и трубопроводов атомных станций. Основные положения. <http://docs.cntd.ru/document/420311970>
- [32] НП-017-2000. Основные требования к продлению срока эксплуатации блока атомной станции. <http://docs.cntd.ru/document/1200034210>
- [33] НП-071-18. Правила оценки соответствия продукции, для которой устанавливаются требования, связанные с обеспечением безопасности в области использования атомной энергии, а также процессов ее проектирования (включая изыскания), производства, строительства, монтажа, наладки, эксплуатации, хранения, перевозки, реализации, утилизации и захоронения. <http://docs.cntd.ru/document/542618368>
- [34] НП-071-06. Правила оценки соответствия оборудования, комплектующих, материалов и полуфабрикатов, поставляемых на объекты использования атомной энергии. <http://docs.cntd.ru/document/1200046475>
- [35] НП-071-06 (с изм. от 16.03.2018). Правила оценки соответствия оборудования, комплектующих, материалов и полуфабрикатов, поставляемых на объекты использования атомной энергии.
- [36] IAEA. Methodology for qualification of in-service inspection systems for WWER nuclear power plants. IAEA-EBP-WWER-11, 1998.
- [37] ENIQ Report nr.12. ENIQ Glossary, Issue 2. Eur18102en, 1999.

- [38] ENIQ Report nr.31. European methodology for qualification of non-destructive testing, Issue 3. Eur22906en, 2007.
- [39] Постановление Правительства Российской Федерации от 23.04.2013 №362 «Об особенностях технического регулирования в части разработки и установления государственными заказчиками, федеральными органами исполнительной власти, уполномоченными в области государственного управления использованием атомной энергии и государственного регулирования безопасности при использовании атомной энергии, и Государственной корпорацией по атомной энергии "Росатом" обязательных требований в отношении продукции, для которой устанавливаются требования, связанные с обеспечением безопасности в области использования атомной энергии, а также процессов проектирования (включая изыскания), производства, строительства, монтажа, наладки, эксплуатации, хранения, перевозки, реализации, утилизации и захоронения указанной продукции» [http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001201304260009](http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001201304260009;);
- [40] Постановление Правительства Российской Федерации от 12.07.2016 №669 «Об утверждении Положения о стандартизации в отношении продукции (работ, услуг), для которой устанавливаются требования, связанные с обеспечением безопасности в области использования атомной энергии, а также процессов и иных объектов стандартизации, связанных с такой продукцией» <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001201607140004>;
- [41] Постановление Правительства Российской Федерации от 15.06.2016 №544 «Об особенностях оценки соответствия продукции, для которой устанавливаются требования, связанные с обеспечением безопасности в области использования атомной энергии, а также процессов ее проектирования (включая изыскания), производства, строительства, монтажа, наладки, эксплуатации, хранения, перевозки, реализации, утилизации и захоронения» <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001201606170022>;
- [42] Постановление Правительства Российской Федерации от 20.07.2013 №612 «Об аккредитации в области использования атомной энергии» <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001201307290007>.
- [43] ГОСТ Р 50.04.07-2018. Система оценки соответствия в области использования атомной энергии. Оценка соответствия в форме испытаний. Аттестационные испытания систем неразрушающего контроля. <http://docs.cntd.ru/document/1200158657>
- [44] ГОСТ Р 1.2-2016. Стандартизация в Российской Федерации. Стандарты национальные Российской Федерации. Правила разработки, утверждения, обновления, внесения поправок и отмены /действовал на момент введения в действие стандарта [43]/.
- [45] ГОСТ Р 50.05.16-2018. «Система оценки соответствия в области использования атомной энергии. Оценка соответствия в форме контроля. Неразрушающий контроль. Метрологическое обеспечение» (введен в действие с марта 2019 г. как ГОСТ Р 50.05.16-2019).
- [46] Технический комитет по стандартизации ТК322 «Атомная техника». Протокол №73-МК/2018-Пр от 27.09.2018 г. Заседание по обсуждению предложений по внесению изменений в ГОСТ Р 50.04.07-2018 «Система оценки соответствия в области использования атомной энергии. Оценка соответствия в форме испытаний. Аттестационные испытания систем неразрушающего контроля» и вопроса утверждения проекта проекта стандарта ГОСТ Р «Система оценки соответствия в области использования атомной энергии. Оценка соответствия в форме контроля. Неразрушающий контроль. Метрологическое обеспечение».
- [47] АО ИК «АСЭ». Протокол заседания Объединенного научно-технического совета от 23.08.2018 г. №40-1.2С/156-Пр. Приложение 3. Аржаев А.И. Предложения по стандартизации подходов к обоснованию концепции ТПР (часть 1).
- [48] IAEA. Basic Safety Principles for Nuclear Power Plants 75-INSAG-3 Rev. 1. A Report by the International Nuclear Safety Group. INSAG Series No. 12 / IAEA – V.: IAEA, 1999 – 97 p.
- [49] АО «Концерн Росэнергоатом». Разработка технического задания, проведение испытаний и условия применения средств и методик неразрушающего контроля на атомных станциях. Требования. РД ЭО 0487-2005, 2005.
- [50] АО «Концерн Росэнергоатом». Разработка технического задания, проведение испытаний и условия применения средств и методик неразрушающего контроля на атомных станциях. Требования. РД ЭО 1.1.2.25.0487-2015, 2015.
- [51] ФГАОУ ВО СПбПУ, ООО «НПО «ДИА-ПРОК». О дефицитах применения концепции «Течь перед разрушением» к контуру теплоносителя реактора блоков атомных станций разных поколений. Научно-технический отчет, 2018.
- [52] ГОСТ Р 58328-18. Трубопроводы атомных станций. Концепция «течь перед разрушением».
- [53] РД 95 10547-99 Руководство по применению концепции безопасности течь перед разрушением к трубопроводам АЭУ. Р-ТПР-01-99.
- [54] U.S. NRC, «Leak-Before-Break Evaluation Procedures», Standard Review Plan (SRP), Section 3.6.3, NUREG-0800.
- [55] H. Schulz. The Evolution of the Break Preclusion Concept for Nuclear Power Plants in Ger-

- many. Proceedings of the Seminar on Leak Before Break in Reactor Piping and Vessels. Lyons, France, 9-11 October 1995.
- [56] Антонов М.И., Аржаев А.А., Аржаев А.И., Ершов Г.А., Калютик А.А., Карякин Ю.Е., Маханев В.О. Проблемные вопросы обеспечения целостности трубопроводов и корпусов оборудования АС. // 11-я Международная научно-техническая конференция «Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР» (МНТК-2019, г. Подольск, Россия, 21-24 мая 2019 г.).
- [57] АО «Концерн Росэнергоатом». Руководство по применению концепции безопасности течь перед разрушением к трубопроводам действующих АЭУ. РД ЭО 1.1.2.05.0939-2013.
- [58] АО «Концерн Росэнергоатом». Концепция безопасности «течь перед разрушением» для контура теплоносителя атомных станций. РД ЭО 1.1.2.05.0939-2016.
- [59] IAEA. Mitigation of intergranular stress corrosion cracking in RBMK reactors. Final report of the programme's steering committee. IAEA-EBP-IGSCC, 2002.
- [60] Nuclear Safety Standards Commission (KTA), Verification Analysis for Rupture Preclusion for Pressure Retaining Components in Nuclear Power Plants., Safety Standard KTA 3206, 2014.
- [61] ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», ООО «НПО «ДИАПРОК». О дефицитах применения концепции «течь перед разрушением» к контуру теплоносителя реактора блоков атомных станций разных поколений. Научно-технической отчет, сентябрь 2018г.
- [62] НП-010-16. Правила устройства и эксплуатации локализующих систем безопасности атомных станций (с изменениями на 17 января 2017 года). <http://docs.cntd.ru/document/420341403>.
- [63] ГК «Росатом». Программа проведения технических семинаров «Проектирование трубопроводов в соответствии с ASME BPVC и EN 13480» и «Практика применения концепции «Течь-перед-разрушением» на АЭС американского и французского дизайна» в период 4-6 июня 2019, Санкт-Петербург, Россия.
- [64] SSR-2/1. Безопасность атомных электростанций: проектирование. Нормы безопасности МАГАТЭ, 2012.
- [65] SSR-2/1, rev 1. Безопасность атомных электростанций: проектирование. Нормы безопасности МАГАТЭ, 2016.
- [66] АО «Атомкомплект». Закупка <http://zakupki.rosatom.ru/1205251065154>.
- [67] АО «Атомкомплект». Закупка <http://zakupki.rosatom.ru/1603141065056>.
- [68] АО «Атомкомплект». Закупка <http://zakupki.rosatom.ru/1509251065277>.
- [69] АО «Атомкомплект». Закупка <http://zakupki.rosatom.ru/1512011065368>.
- [70] А.А.Арефьев. «Оценка соответствия систем неразрушающего контроля состояния металла оборудования, трубопроводов и других элементов АС в рамках ГОСТ Р 50.04.07-2018». Приложение к протоколу №73-МК/2018-Пр от 27.09.2018 г. [46].
- [71] Письмо ООО «НПО «ДИАПРОК» исх.№14-04/135 от 18.06.2020 в адрес ТК 322 «Атомная техника».