

К ВОПРОСУ О НОРМАТИВНОМ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКОМ ОБЕСПЕЧЕНИИ ПРОЕКТОВ АТОМНЫХ СТАНЦИЙ МАЛОЙ МОЩНОСТИ

Антонов М.И., Калютник А.А., Карякин Ю.Е., Модестов В.С.
(ФГАОУ ВО СПбПУ, Санкт-Петербург, Россия),
Аржаев А.А., Аржаев А.И., Маханев В.О., Сиваков С.П.
(ООО «НПО «ДИАПРОК», Москва, Россия)

С 2011 года МАГАТЭ осуществляет целевые публикации по тематике атомных станций малой мощности (АСММ).

Две первых конференции по АСММ в России состоялись в ноябре 2011 года и в декабре 2013 года на базе Президиума РАН.

Несмотря на актуальность тематики и большое количество предлагаемых вариантов (<https://aris.iaea.org/>), в стадии сооружения на май 2023 года находятся всего 7 АСММ, а в стадии эксплуатации – 3.

Разработкой АСММ кроме России интенсивно занимаются во многих странах, например, в США, Канаде, Японии.

Оснащение производств надежными источниками энергоснабжения на базе АСММ в ближайшие 10-20 лет представляется выполнимым (с учетом широкого спектра мощностей АСММ, предлагаемых к разработке) для регионов с децентрализованным энергообеспечением.

Актуальность этой задачи повышается ввиду отсутствия готовых к реализации проектов АЭС средней мощности, например, таких как наиболее распространенный в мире проект ВВЭР-440.

Ключевыми вопросами для практического применения АСММ являются: (1) обеспечение ядерной и радиационной безопасности и (2) конкурентоспособность на базе современных технологий изготовления конструкций, систем и элементов АСММ, а также информационных технологий.

Стоимостные показатели проекта АСММ будут в существенной степени зависеть от требований заказчика к сроку службы и уровню мощности. Возможно, что для АСММ не будет стоять задача по долгосрочной эксплуатации в 60 и более лет ввиду ускоренного технологического развития и возможности замещения АСММ на той же площадке более конкурентоспособными инновационными решениями.

При разработке нормативных документов для проектирования и эксплуатации АСММ представляется целесообразным учесть Стратегический план исследований по безопасности для российских АЭС, разработанный по поручению Министерства по атомной энергии в конце 1990-х, и актуализировать его с учетом современного уровня развития науки и техники, а также с появлением направления АСММ.

Одним из базовых вопросов при разработке проектов АСММ является учет возможных механизмов старения. Решение этого вопроса для АСММ, разрабатываемых в России, может базироваться на выполнении требований пункта 16 НП-096-15. Однако отметим, что указанное требование не детализировано для элементов АС (тем более – для АСММ), а документы по стандартизации в поддержку НП-096-15, описывающие особенности механизмов старения для различных групп элементов АС, а также методики выявления доминирующих механизмов старения в настоящее время отсутствуют.

Введение

Начало 1990-х годов является неким рубежом, когда после аварий на блоке № 2 АЭС «Три-Майл Айленд» (США) [1] и на энергоблоке № 4 ЧАЭС [2] перед странами, развивающими атомную энергетику (АЭ), встали кардинальные вопросы ее развития в будущем.

Повестка дня конференции МАГАТЭ «Безопасность ядерной энергетики: стратегия на будущее» [3] включала следующий набор тем для обсуждения:

- (i) Основополагающие принципы безопасного использования ядерной энергии;
- (ii) Обеспечение и повышение безопасности действующих АЭС;
- (iii) Обращение с АЭС, сооруженных в соответствии с ранее принятыми нормами;
- (iv) Следующее поколение АЭС;
- (v) Окончательное захоронение радиоактивных отходов.

Итоги конференции [3] способствовали выстраиванию долгосрочной политики стран-членов МАГАТЭ по решению поставленных вопросов.

Тема (i) получила развитие в деятельности международной консультативной группы по ядерной безопасности (INSAG) при Генеральном директоре МАГАТЭ. Самый первый документ, подготовленный в 1986 году указанной группой, был посвящен рассмотрению причин и последствий аварии в Чернобыле [4] (спустя пять лет он был обновлен [5]). В состав серии документов МАГАТЭ по совершенствованию безопасности АЭС вошли: INSAG-3 «Основные принципы безопасности атомных электростанций» [6], INSAG-4 «Культура безопасности» [7] и INSAG-10 «Глубокоэшелонированная защита в ядерной безопасности» [8].

В связи с темой (iii) на конференции было отмечено, что «управление последствиями старения АЭС становится все более важным по мере старения АЭС, чтобы обеспечить поддержание адекватных пределов безопасности; для этого требуется вспомогательная программа исследований механизмов старения и их влияния на безопасность». Первые документы МАГАТЭ по вопросам управления старением (Ageing Management) [9-10] были выпущены практически одновременно с вышеупомянутой конференцией МАГАТЭ. Старение элементов АЭС было определено в [9] как непрерывная зависящая от времени деградация материалов в условиях, которые включают все режимы нормальной эксплуатации (постулируемые аварийные и поставарийные условия при этом не рассматриваются).

К началу 2000-х годов необходимость мер по управлению старением конструкций, систем и элементов была признана актуальной для всех АЭС [11], рассмотренных в 1991 году в рамках тем (ii), (iii) и (iv) [3].

Дальнейшее развитие АЭ многие страны-члены МАГАТЭ связывали с применением атомной энергии не только для выработки электрической и тепловой энергии, но и для опреснения морской воды [12-13].

Тема (iv) из [3] о следующем поколении АЭС, непосредственно связанная с темой настоящего доклада, в период 1991-2001, благодаря активности МАГАТЭ, получила мощное развитие по различным направлениям атомных реакторов [14-18] с выделением малых модульных реакторов (ММР) и атомных станций малой мощности (АСММ) в отдельное направление [19-20].

Перспективам реализации темы (v) из [3] был посвящен отчет МАГАТЭ [21].

Вопросы АЭС следующего поколения получили дальнейшее развитие в материалах международных конференций 2002 года:

- Семинар по вопросам безопасности усовершенствованных ядерных реакторов и потребностям в исследовательских работах [22];
- Международный форум «Поколение IV» (далее - **Generation IV**) [23].

Наиболее представительным является материал по инновационным реакторам [24], выпущенный МАГАТЭ совместно с Организацией по экономическому

сотрудничеству и развитию (ОЭСР), включая входящие в ОЭСР: Агентство по атомной энергии и Международное энергетическое агентство.

Иллюстративный перечень инновационных конструкций реакторов из документа [24] (с оговоркой, что перечень не является исчерпывающим) включал следующие группы реакторов малой и средней мощности:

- Легководные реакторы (Light-Water Reactors или LWR) – всего 9 позиций;
- Тяжеловодные реакторы (Heavy-Water Reactors или HWR) – всего 2 позиции;
- Жидкометаллические реакторы на быстрых нейтронах (Liquid-Metal Fast Reactors или LMFR) – всего 9 позиций;
- Газовые реакторы (Gas Reactors или GR) – всего 4 позиции;
- Жидкосолевые реакторы (Molten-Salt Reactors или MSR) – всего 3 позиции;
- Ториевые реакторы (Thorium-Fuelled Reactors или TFR) – всего 1 позиция;
- Реакторы централизованного теплоснабжения (District-Heating Reactors или DHR) – всего 5 позиций;
- Децентрализованные тепловые ядерные энергетические реакторы (Decentralised Nuclear-Heating Power Reactors или DNHR) – всего 1 позиция;
- Корабельные реакторы (Ship Reactors или SR) – всего 2 позиции.

По части из реакторов, представленных в [24], разработчики представили оценки по следующим категориям:

- безопасность (Safety);
- экономическая конкурентоспособность (Economic competitiveness);
- защита от распространения и меры безопасности (Proliferation resistance and safeguards);
- обращение с отходами (Waste management);
- эффективность использования ресурсов (Efficiency of resource use);
- гибкость применения (Flexibility of application).

Среди российских разработок в документе [24] были упомянуты БРЕСТ-300, РУ КЛТ-40с, БН-800, РУ «Рута». По первым двум реакторам были приведены оценки разработчиков по указанным выше шести категориям.

В докладе рассмотрены развитие проектов ММР/АСММ, в том числе, представленных в [22-24], и потребности в разработке в РФ нормативного и технологического обеспечения в поддержку применения ММР/АСММ.

1. О подходах к разработке проектов и размещению АСММ

1.1. Общие положения по проектам АСММ

Согласно определению МАГАТЭ, к атомным станциям малой мощности (АСММ) относятся станции с реакторными установками единичной мощностью менее 300 МВт (э).

Последние несколько десятилетий атомные станции (реакторы) малой мощности (АСММ) рассматриваются как самостоятельное направление атомной энергетики со своими областями целесообразного применения.

АСММ - важный элемент безуглеродного энергобаланса будущего, позволяющий обеспечивать ускоренное экономическое развитие арктических и других труднодоступных регионов мира.

Рациональное место размещения АСММ – компактные удаленные и труднодоступные промышленные территории или площадки (объекты) и населенные пункты с перспективой стабильного и растущего спроса на электрические мощности (как правило, в качестве примера такого спроса приводят разработку месторождений полезных ископаемых). АСММ могут применяться для целенаправленного обеспечения электричеством и теплом как промышленных производств, так и бытовой сферы.

По результатам первой конференции по АСММ, проведенной в России [25], были сделаны сообщения по приоритетному размещению атомной энергетики малых мощностей [26-27]. Указанные материалы, как и сборник докладов [25, 28], в целом являются актуальными и сегодня.

На территории Российской Федерации наряду с объединенными энергосистемами (ОЭС) существуют технологически изолированные энергосистемы (ЭС), а также ОЭС, в которых отсутствует производство тепла и электроэнергии на АЭС/АСММ (рис. 1).



Рис.1. Основные ЭС на территории России [29]

В России места размещения АСММ – это, в первую очередь, территории, для экономического функционирования и развития которых необходимо долгосрочное автономное энергетическое снабжение. Использование АСММ представляется актуальным, для (1) технологически изолированных ЭС (Восточная Сибирь, Чукотка, Камчатка), (2) ОЭС Сибири, (3) ОЭС Востока и (4) ОЭС Урала.

Общепринято определять эффективность энергоисточников по стоимости вырабатываемой энергии. По этому критерию энергетические станции малой мощности, в том числе и атомные, закономерно проигрывают крупным станциям. Но такой подход не учитывает особого назначения АСММ – применение в условиях, в которых невозможно (нецелесообразно) применение атомных станций «высокой» мощности, электростанций на органическом топливе, «зеленых» источников. Затраты на сооружение, эксплуатацию, вывод из эксплуатации АСММ – это часть бюджета развития соответствующей территории, объекта, населенного пункта.

АСММ дают возможность существенного расширения рынка для ядерной энергетики путем привлечения пользователей (стран), для которых станции с реакторами большой единичной мощности по той или иной причине недоступны. Исследования рынков развивающихся стран показали, что основные потребности в АСММ связаны с производством электроэнергии и тепла, а применение АСММ для промышленных процессов рассматривается как более отдаленная перспектива.

Уменьшение мощности блока сопровождается ростом величины удельных (на единицу мощности) капитальных вложений. Повышение конкурентоспособности требует применения инновационных решений, обеспечивающих снижение затрат на сооружение и эксплуатацию АСММ, а также упрощение эксплуатации таких АСММ.

АСММ, реализованные в виде отдельных блоков (модулей), позволяют при ограниченных и фиксированных капитальных затратах на строительство отдельного блока поэтапно наращивать (или снижать) суммарную мощность путем добавления

(вывода из эксплуатации) отдельных блоков (модулей). Принципы модульности конструкций самих АСММ и модульности АЭС, как набора АСММ для обеспечения требуемого уровня совокупной мощности (возможно, с единым блочным щитом управления), являются одним из конкурентных преимуществ технологии АСММ.

В материалах анализа [30] приведены данные по сопоставительной стоимости наземного сооружения АСММ и размещения аналогичной АСММ на барже в зависимости от установленной мощности. Для последнего варианта стоимость проекта ниже, что можно объяснить отсутствием на объекте инфраструктуры для обращения со свежим и отработавшим ядерным топливом.

Такие проекты имеют в документах МАГАТЭ специальное наименование: малые реакторы без перегрузки на месте (Small Reactors Without On-Site Refuelling или SRWOR) - это реакторы, предназначенные для нечастой замены топливных кассет [31].

Варианты АСММ категории SRWOR описаны в [32]:

- реакторы транспортабельного типа, изготовленные и загружаемые ядерным топливом на заводе;
- реакторы с разовой заменой активной зоны на площадке, выполняемой внешней командой, которая доставляет новый загрузочный комплект активной зоны и забирает выгруженный комплект активной зоны и оборудование для его перегрузки (пример приведен в [32]).

Общая стратегия поддержки топливного цикла АСММ категории SRWOR дана в [32].

1.2. Рекомендации МАГАТЭ по проектированию и размещению АСММ

МАГАТЭ обобщило результаты работ по тематике АСММ и разработало требования к их проектированию и варианты технологических дорожных карт размещения АСММ [33] (рис. 2).

Для проектирования и размещения АСММ в [33] рекомендовано использовать документы серии стандартов по безопасности МАГАТЭ: в частности, документы [34-36], хотя отмечено, что они были разработаны для традиционных АЭС.



Рис.2. Базовые варианты технологических дорожных карт размещения АСММ

На пути внедрения новых энергетических технологий выявлены два четко выраженных барьера (именуемых «подводными камнями» или «ловушками», или «долинами смерти», как в публикации [37]), которые препятствуют успешной реализации жизненного цикла инноваций: (1) технологическая проблема; (2) проблема коммерциализации (рис. 3).



Рис.3. Процесс разработки инновационного продукта и два барьера [33]

Первая серьезная проблема, связанная с инновациями в области энергетики, является технологической. Она связана с полнотой устранения всех пробелов в решении технологических задач по созданию прототипа или проведению важного теста для подтверждения концепции. Неудача на этом этапе жизненного цикла инновации приводит к тому, что концепция попадает в технологическую ловушку. Этот момент находится между фазой исследований и разработок и фазой прототипа / подтверждения концепции в жизненном цикле инноваций, поскольку исследователи ищут дополнительный капитал для разработки и подтверждения своей базовой концепции.

Второй серьезной проблемой в области энергетических инноваций является коммерциализация. Вопрос заключается в том, является ли технология надежной, принятой регулирующим органом и конкурентоспособной по стоимости по сравнению с ее альтернативами. Если новая технология терпит неудачу на этом этапе, она попадает в ловушку коммерциализации. Это происходит позже в процессе разработки технологии, и представляет собой момент, когда предприниматели ищут капитал для финансирования проекта головного образца коммерческого масштаба и / или производственного объекта.

В публикации [37] описаны целенаправленные меры, предпринятые в США в целях облегчить преодоление «технологического барьера» и «барьера коммерциализации» на пути разработчиков инновационных энергетических технологий, включая MMP/ACMM. Создание в США неправительственной организации CEDA (Clean Energy Deployment Administration) позволило наладить деловой подход к привлечению инвестиций частного сектора в инновации и коммерциализацию экологически чистой энергии.

МАГАТЭ проводит систематическую работу по определению и обоснованию целесообразности разработок MMP/ACMM, табл.1 [38].

Таблица 1

Характеристики MMP, обеспечивающие им преимущества

Основные целевые показатели	Преимущества
Экономика (Economic) Более низкие первоначальные капитальные затраты (Lower Upfront capital cost) Экономия на серийном производстве (Economy of serial production)	Лучшая доступность по цене (Better Affordability)
Модульность (Modularization) Возможность объединения нескольких модулей (Multi-module) Модульность конструкции (Modular Construction)	Сокращение сроков сооружения (Shorter construction time)
Гибкость в применении (Flexible Application) Удаленные регионы (Remote regions) Малые энергосистемы (Small grids)	Широкий круг пользователей (Wide range of Users)
Меньшая занимаемая площадь (Smaller footprint) Уменьшенная зона планирования на случай чрезвычайных ситуаций (Reduced Emergency planning zone)	Гибкость в выборе площадки размещения (Site flexibility)
Замена стареющим электростанциям, работающим на ископаемом топливе (Replacement for aging fossil-fired plants)	Снижение выбросов CO ₂ (Reduced CO ₂ production)
Потенциал создания гибридной энергетической системы (Potential Hybrid Energy System)	Интеграция с возобновляемыми источниками энергии (Integration with Renewables)

Успехи в продвижении MMP/АСММ различных типов зависят от потребности заинтересованных сторон в их применении не только для генерации электроэнергии, но и для иных промышленных целей, рис.4 [38].

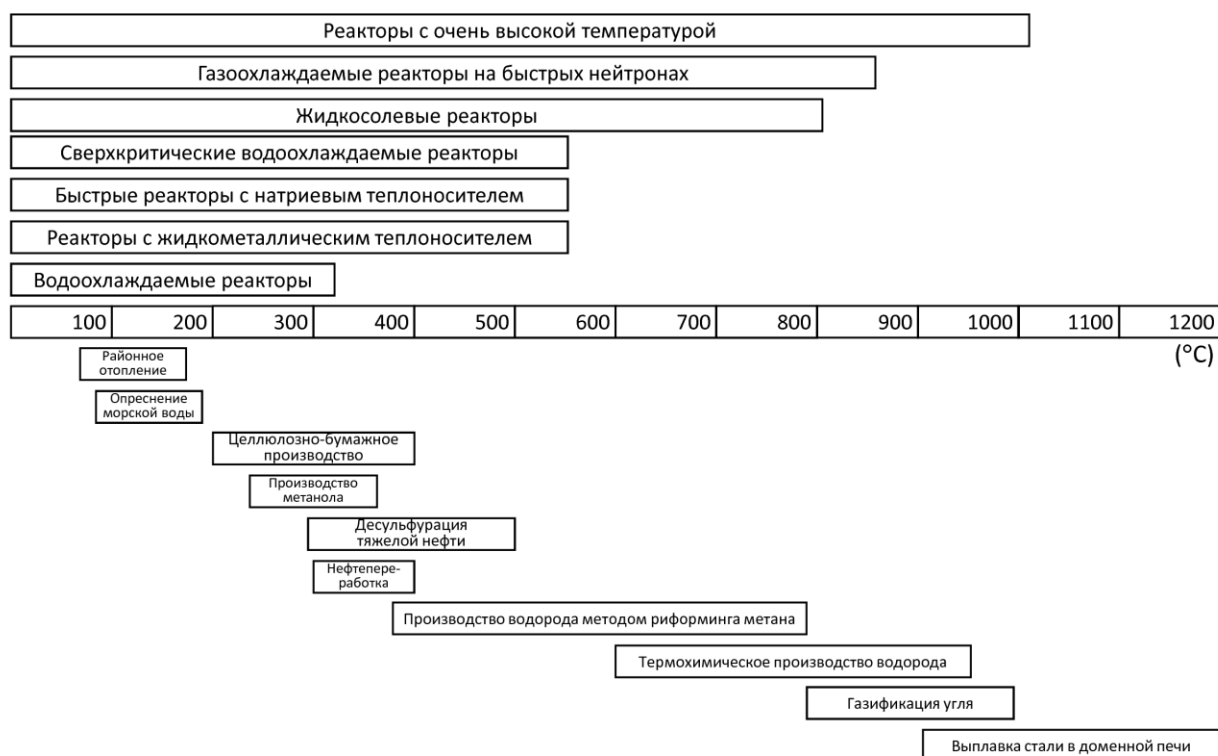


Рис.4. Возможности неэлектрических приложений для MMP [38]

Бельгийская инженерная фирма Tractebel сформулировала свои подходы к продвижению на рынок проектов ММР [39], включая:

- Критерии непригодности;
- Предварительную оценку технологии (в том числе, многокритериальную сравнительную оценку и публичное информационное обеспечение);
- Углубленную проработку (в том числе, (1) Установление привилегированных контактов с поставщиками и (2) Углубленную технологическую оценку).

Среди основных критериев непригодности следует отметить следующие:

- наличие в проекте только активных систем безопасности;
- изначально установленный порог стоимости;
- несовместимость с целями, заданными пользователем.

Важнейшие факторы успеха проекта были сформулированы, как показано на рис.5.

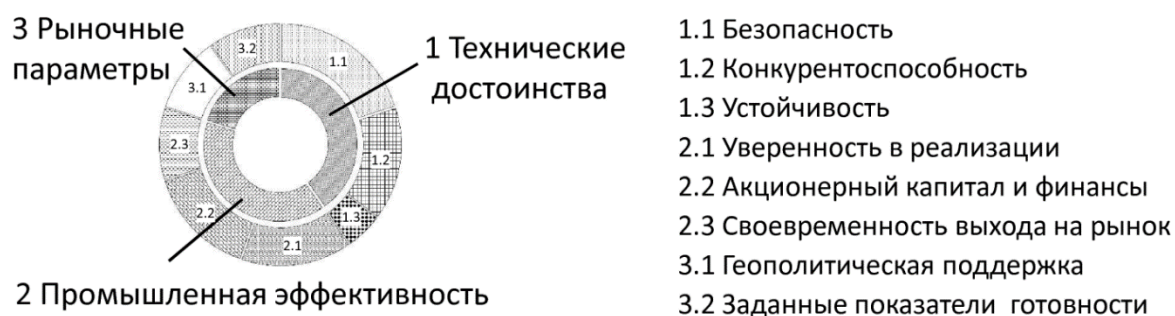


Рис.5. Важнейшие составляющие успешного проекта ММР [39]

1.3. Текущий статус разработки АСММ в мире

В целом, за период времени с выпуска обзора [24] количество проектов АСММ существенно увеличилось.

В буклете МАГАТЭ [40] представлена информация по разработкам АСММ: 71 проект распределен по следующим категориям:

- ММР с водяным охлаждением (наземного базирования): 25 проектов, из них от России – 5;
- ММР с водяным охлаждением (морского базирования): 8 проектов, из них от России – 5;
- высокотемпературные газоохлаждаемые ММР: 17 проектов, из них от России – 3;
- ММР на быстрых нейтронах с жидкометаллическим охлаждением: 8 проектов, из них от России – 2;
- жидкосолевые ММР: 13 проектов (в [40] информация о проектах от России не представлена).

По многим проектам ММР/АСММ, представленным в [40], уже имеются дорожные карты по их размещению на ближнесрочную перспективу.

В буклете МАГАТЭ [40] также представлена информация по разработкам 12 микрореакторов, два проекта из которых представлены от России.

В указанный обзор МАГАТЭ не попала важная информация, что «Государственное управление Китая по ядерной безопасности выдало разрешение на эксплуатацию первого в стране ториевого реактора мощностью 2 МВт. Он будет находиться в городе Увэй в провинции Ганьсу на севере страны. Эксплуатация реактора начнется с испытаний» [41].

Планы Индии по созданию ториевого реактора известны уже не менее 15 лет [42], но пока не воплощены в жизнь: производство электроэнергии осуществляется на

реакторах типа LWR (включая блоки АЭС с ВВЭР-1000) и на реакторах с тяжеловодным замедлителем CANDU.

В дополнение к информации по проектам ММР/АСММ, представленной в обзоре [40], появилась информация о заинтересованности в аналогичных проектах многих стран, которые пока не имеют АЭ. В документе МАГАТЭ [43] представлена информация об интересе к созданию национальной АЭ на базе ММР/АСММ в странах Азии и Африки, которые могут быть потенциальными заказчиками российских технологий в указанной области.

В странах ЕЭС уделено большое внимание выработке общих подходов к практической реализации технологий ММР/АСММ. Технологическая платформа устойчивой ядерной энергетики (Sustainable Nuclear Energy Technology Platform или SNETP) была создана в сентябре 2007 года в качестве научно-исследовательской и инновационной платформы (R&D&I) для поддержки и продвижения безопасной, надежной и эффективной эксплуатации гражданских ядерных систем II, III и IV поколений.

Основными столпами SNETP являются рабочие группы [44]:

- Европейская инициатива по устойчивому развитию атомной промышленности – ESNI (European Sustainable Nuclear Industrial Initiative);
- Ядерная когенерация – NC2I (Nuclear cogeneration);
- Ядерная ассоциация на базе поколений II и III – NUGENIA (Nuclear Gen II & III Association).

Для технологий ММР были определены следующие основные приоритеты НИОКР в области строительства, эксплуатации, контроля в процессе эксплуатации, аттестации и неразрушающего контроля [45]:

- Оценка безопасности существующих концепций: осуществимость и преимущества присущих им функций безопасности (например, естественное конвекционное охлаждение и пассивный отвод остаточного тепловыделения);
- Пересмотр классификации компонентов по безопасности;
- Разработка и аттестация компонентов (например, компактных теплообменников) и производственных процессов их изготовления;
- Человеческий фактор при использовании многомодульных установок, управляемых из одной диспетчерской или удаленно;
- Снижение затрат за счет упрощения конструкции, компактности и модульности;
- Передовое производство, сборка и цифровизация процессов;
- Экономика и финансирование (например, влияние серийного производства на доступность по цене, требуемый порог для заказов, анализ вариантов финансирования);
- Доступность объекта (водяное или воздушное охлаждение);
- Лицензирование (с учетом стандартизации и упрощения конструкции);
- Принятие аспектов модульности;
- Гибридные энергетические системы, производство водорода, аккумулирование электрической энергии /хранение энергии и когенерация;
- Содействие ускорению сроков проведения демонстрации.

Перечисленные рекомендуемые направления НИОКР для ММР, как и упомянутые ранее рекомендации МАГАТЭ, заслуживают анализа применительно к планам разработки ММР в России. На привлекательность применения ММР не только для целей электрогенерации указывают результаты опроса среди стран Европейского экономического сообщества (ЕЭС), представленные в табл.2 [45].

Таблица 2

Сводка ответов на опросный лист

	Чехия	Финляндия	Венгрия	Литва	Польша	Испания	Швеция	Турция
Ответ дан от	MS	NF	NF	NF	MS	NF	NF	MS
Рассматриваете ли применение атомной энергии	Да	Да	Да	Нет	Да	Нет	Да	Да
Рассматриваете ли применение ММР	Да	Да	Нет	Нет	Нет	Нет	Да	Да
Рассматриваете ли применение ММР в будущем	–	–	Да	Да	Да	Нет	–	–
Планируемые варианты применения	Е, ДН, ИН, Н ₂	Е, ДН, Н ₂	Е, ДН	Е, ДН	Е, ДН, ИН	–	Е, ДН, ИН, Н ₂	Е, ДН, ИН, Н ₂

MS – ответ правительства страны-члена ЕЭС; NF – ответ от представителей ядерного сообщества;

Е – электроэнергия; ДН – районное отопление; ИН – тепло для промышленных целей;

Н₂ – производство водорода

Крупнейшая в мире французская эксплуатирующая организация - Électricité de France (EDF) – кроме сооружения 2-х новых блоков мощностью 1670 МВт к середине 2030-х [47] проявляет практический интерес и к сооружению двух блоков ММР мощностью 170 МВт каждый для АЭС Nuward [48-49].

Финляндия планирует использовать ММР для районной теплофикации [50].

Польша сделала решительный шаг по созданию национальной АЭ [51], в составе которой предусмотрено применение технологии ММР.

Компания Fermi Energia была основана эстонскими специалистами в области энергетики, в том числе атомной, для разработки проекта малой АЭС в Эстонии. В настоящее время выбран проект ММР BWRX-300 от GE-Hitachi для строительства в Эстонии [52].

Указанные планы разработки и ввода в эксплуатацию ММР/АСММ с учетом приемлемого уровня готовности проектов (технологического и необходимого для лицензирования) по факту соответствуют рекомендациям [53] по стадийности сокращения углеродного следа к 2050 году и поддержанию этого состояния на дальнейшую перспективу. Укрупненные «окна возможностей» для дополнения АЭ применением ММР/АСММ в [53] включают применение в 2030-х и 2040-х отработанных на практике технологий (например, реакторов с водяным теплоносителем), в 2050-х и далее – доработанных реакторов с жидкометаллическим охлаждением, жидкосолевых высокотемпературных газовых реакторов.

1.4. Текущий статус разработки АСММ в России и перспективы

В России за ~20 лет после выхода в свет документа [24] года отмечен существенный прогресс в части реализации включенных в него проектов АЭС средней и малой мощности:

- введен в эксплуатацию блок № 4 Белоярской АЭС с реактором БН-800 [54];
- введена в эксплуатацию ПАТЭС «Академик Ломоносов» с реакторами КЛТ-40с [55];
- в стадии сооружения находится опытно-демонстрационный реактор БРЕСТ-300 [56].

В предыдущем подразделе отмечено участие проектов АСММ от России в числе представленных в [40].

В конце 2022 года появилась информация от Госкорпорации «Росатом», что «АО «НИКИЭТ» (предприятие Госкорпорации «Росатом») завершило разработку эскизного проекта реакторной установки (РУ) с инновационным исследовательским реактором с циркулирующим расплавом топливной соли (ИЖСР)» [57].

Таким образом, Российская Федерация принимает участие во всех сегментах разработки/размещения АСММ.

На основании обширных материалов по проблематике АСММ, разработанных отечественными специалистами [25, 28] и международными организациями (МАГАТЭ [14-21, 31-38, 40, 43], ОЭСР [22, 24, 30, 53, 58]), представляется возможным сформулировать некоторые характерные черты наиболее перспективного проекта АСММ в горизонте 2030-2035 и далее:

- продолжительный цикл перегрузки топлива: 10-20 лет и более;
- АСММ категории SRWOR [31-32] транспортабельного типа;
- использование тория как воспроизводящего компонента ядерного топлива (fertile component of nuclear fuel).

Оптимизм для последней рекомендации дают материалы по промышленной реализации ториевого режима в СССР [59], а также по практическому опыту создания жидкосолевого реактора-размножителя на ториевом топливе [60].

Следует упомянуть информацию в [24] о RTFR (Radkowsky Thorium Fuel Reactor), а также о положительном влиянии ториевого топлива на режим нераспространения в атомной энергетике [61].

В Российской Федерации была подана международная заявка на патент «Способ управления ториевым ядерным реактором и тепловыделяющая сборка для его осуществления» [62].

В публикации 5-летней давности [63] были сделаны следующие выводы:

- Концепции жидкосолевого реактора предлагают альтернативные варианты воспроизводства нового топлива и сжигания долгоживущих отходов с добавленной стоимостью жидкого топлива (характеристики внутренней безопасности, гибкость топливного цикла, упрощенная обработка топлива, проверка в процессе эксплуатации, отсутствие необходимости в транспортировке и переработке топлива);
- Значительный прогресс достигнут в разрешении (или отмене) критических вопросов жизнеспособности (совместимость материалов, физические и химические свойства соли, осуществимость переработки, внутренняя безопасность);
- Необходимо провести предварительные концептуальные исследования всего реактора и установки по переработке, чтобы установить жизнеспособность жидкосолевого реактора (реактор и установка по очистке топливной соли должны быть оптимизированы вместе);
- Экспериментальная инфраструктура (аналитические и интегральные солевые контуры с использованием реальных топливных солей) необходима для дальнейшего освоения технологий жидкосолевого реактора (например, контроль содержания трития) и тестирования компонентов (насос с длинным валом, теплообменник и т.д.).

Поэтому имеются все основания для рекомендации: включить в Стратегию развития атомной отрасли России на период до 2030 года работы согласно выводам работы [63] и обеспечить их финансированием.

С учетом того обстоятельства, что все страны БРИКС являются участниками работ по применению гражданских ядерных реакторов [64], представляется актуальным объединить усилия в рамках БРИКС для разработки линейки реакторов малой и средней

мощности, работающих на ториевом топливе, запасы которого на нашей планете, в том числе, еще по оценкам советских ученых [65] превосходят запасы урана.

2. О технологическом обеспечении проектов АСММ

2.1. О возможностях создания новых материалов и инновационных технологий сварки

В докладах, представленных на Международной конференции по сварке в мае 2023 года [66-67], приведены примеры производства отдельных элементов конструкций тепломеханического оборудования на базе аддитивных технологий, представлены характеристики новых сварочных материалов (например, порошковой сварочной проволоки).

В рамках Федерального проекта № 4 «Разработка новых материалов и технологий для перспективных энергетических систем» (U4) [68] осуществляется научно-технологическое развитие аддитивных технологий при изготовлении элементов АЭС, в частности:

- 3D-печать порошковыми материалами;
- 3D-печать проволочными материалами;
- 3D-печать композитными материалами.

В частности, задача на 2023 год: «Оборудование и технология прямого лазерного выращивания для печати сложнопрофильных крупногабаритных элементов ВКУ, ВВЭР ТОИ». Успешное решение указанной задачи создаст предпосылки для адаптации разработанных технологий для производства деталей АСММ и микрореакторов.

На конференции [66] был сделан доклад «Создание материалов и технологии сварки оборудования реакторных установок на быстрых нейтронах с теплоносителем «СВИНЕЦ» по проекту РУ БРЕСТ-ОД-300». В случае успешной отработки поставленных задач возможен перенос результатов на процессы изготовления узлов оборудования для АСММ с жидкометаллическим теплоносителем.

От ФГАОУ ВО «СПбПУ» на конференции были сделаны доклады [69-70] по направлениям работ, результаты которых в перспективе могут быть использованы для создания конструкционных материалов для конструкций и оборудования АСММ, разрабатываемых для условий северных регионов Российской Федерации.

Задачи по созданию новых материалов и инновационных технологий сварки для конструкций и оборудования атомной техники в рамках Федерального проекта № 4 [68], по-видимому, потребуют корректировки федеральных норм и правил в области использования атомной энергии (ФНП) [71-73] или разработки отдельных нормативных документов для инновационных проектов АЭС, включая АСММ.

2.2. Обеспечение повышенных требований по надежности элементов АСММ

Специфика АСММ, предназначенных для устойчивого энергообеспечения производств или населенных пунктов в удаленных районах России (рис.1), состоит в том, что количество обслуживающего персонала (в том числе, персонала, выполняющего работы по техническому обслуживанию и ремонту оборудования) должно быть минимизировано в сравнении с объектами большой энергетики.

Нормативный документ уровня ФНП – НП-096-15 [74] – категорически непригоден для обеспечения высоких показателей надежности элементов АСММ.

Декларацию в Национальном докладе [75] о соответствии ФНП [74] рекомендациям стандарта по безопасности МАГАТЭ [34] целесообразно в самое ближайшее время выполнить на практике, согласовав терминологию по управлению ресурсом оборудования и трубопроводов в [74] с национальными стандартами по надежности [76-77], а также дополнив документ [74] положениями, соответствующими Требованию 31 из стандарта [34] (табл.3).

Аналогичным образом необходимо учесть при корректировке документа [74] Требование 14 из стандарта [36] (табл.3) для стадий ввода блока АЭС с эксплуатацию и эксплуатации.

Таблица 3

Требования по управлению старением конструкций, систем и элементов

SSR-2/1 rev.1 [34]	SSR-2/2 rev.1 [36]
Требование 31. Управление старением Должен быть рассчитан и указан проектный срок службы узлов АЭС, важных для безопасности. В целях обеспечения способности узлов, важных для безопасности, выполнять в течение всего проектного срока службы предписанные им функции безопасности при проектировании должны предусматриваться надлежащие запасы надежности с таким расчетом, чтобы надлежащим образом учитывались соответствующие механизмы старения, охрупчивания при нейтронном воздействии и износа, а также потенциального ухудшения характеристик вследствие старения. 5.51. При проектировании АЭС должны надлежащим образом учитываться эффекты старения и износа во всех эксплуатационных состояниях, для которых предназначен тот или иной элемент, включая испытания, техническое обслуживание, простой вследствие технического обслуживания, состояния станции при возникновении постулируемого исходного события и состояния станции после постулируемого исходного события. 5.52. Должны предусматриваться меры для осуществления контроля, испытаний, отбора проб и инспектирования в целях оценки механизмов старения, прогнозируемых на стадии проектирования, и содействия определению непредвиденного поведения станции или ухудшения характеристик, которые могут проявиться во время эксплуатации.	Требование 14: управление старением С целью обеспечения выполнения требуемых функций безопасности систем, конструкций и элементов в течение всего срока эксплуатации станции эксплуатирующая организация организует осуществление эффективной программы управления старением. 4.50. Программа управления старением определяет последствия старения и виды деятельности, необходимые для сохранения работоспособности и надежности конструкций, систем и элементов. Программа управления старением координируется и согласуется с другими соответствующими программами, в том числе с программой периодического рассмотрения безопасности. Используется системный подход, предусматривающий разработку, осуществление и непрерывное совершенствование программ управления старением. 4.51. В качестве части программы управления старением проводятся оценка и анализ долгосрочных эффектов, являющихся результатом воздействия эксплуатационных условий и условий окружающей среды (т. е. температурных условий, радиационных условий, эффектов коррозии или других ухудшений параметров станции, которые могут повлиять на долговременную надежность оборудования или конструкций станции). В программе учитывается важность конструкций, систем и элементов с точки зрения безопасности.

Термин «ресурсные характеристики» из [74], который не применяется в науке о надежности и в действующих национальных стандартах [76-77], необходимо привести в соответствие с терминологией в указанных национальных стандартах по надежности не только в [74], но и в [78-79]. Так до 2015 года в п.2.1 2 [80] было записано: «Конструкции оборудования и трубопроводов должны обеспечивать работоспособность, надежность и безопасность их эксплуатации в течение срока службы, который должен быть указан в технических условиях на изделие и паспортах», что представляется гораздо более корректной в техническом отношении формулировкой, чем аналогичный пункт в НП-089-15 [78]: «14. Срок службы и ресурсные характеристики оборудования и трубопроводов устанавливаются разработчиком и должны быть указаны в проектной или конструкторской документации». В документе [81], который предшествовал [79], в расшифровке термина «10 Техническое состояние» и в пункте 4.5 было использовано словосочетание «управление надежностью (ресурсом)», которое также более адекватно передавало смысл требования.

Безусловным приоритетом для ММР/АСММ является обеспечение ядерной и радиационной безопасности, однако их целевой функцией является энергообеспечение

промышленных и жилых объектов согласно проектной документации и требованиям заказчика. Поэтому любые недоработки проекта АЭС, приводящие к отказам и недовыработке энергии, не отвечают понятию «устойчивая генерация», как это произошло в 2021-2023 годах на АЭС Франции [82].

Концепция глубокоэшелонированной защиты и в России [83] (а также [72-73]), и в странах ЕЭС [84] включает требования по неразрушающему контролю (НК) состояния металла оборудования и трубопроводов АЭС как при изготовлении, так и при эксплуатации. По состоянию на сегодняшний день [84] является составной частью Ядерной ассоциации на базе поколений II и III – NUGENIA (устанавливающей требования к оценке соответствия систем НК: методик, средств НК и персонала, выполняющего контроль), которая входит в SNETP [44].

В США требования к НК оборудования и трубопроводов АЭС при эксплуатации определены в [85], в том числе, и в части процедуры аттестации систем НК по методологии PDI (Performance Demonstration Initiative). Для новых реакторов и АСММ был разработан дополнительный раздел [86]: Управление надежностью и целостностью (RIM) – в качестве методологии для установления критериев проверки (включая НК) в процессе эксплуатации независимо от технологии. RIM - это подробный процесс установления критериев оперативного мониторинга ожидаемых механизмов деградации, которые, как ожидается, произойдут независимо от технологии реактора (например, в реакторах с водяным или жидкометаллическим охлаждением, в жидкосолевых или высокотемпературных газовых реакторах и т.д.). Критерии RIM могут быть установлены детерминированными или вероятностными методами.

Составными частями технологии RIM являются мониторинг и НК (NDE) (которые в совокупности имеют обозначение - MANDE). Требования к мониторингу и НК для конструкций, систем и элементов (КСЭ) должны быть назначены на основе ожидаемых механизмов деградации в сочетании с вкладом отдельной составляющей КСЭ в риск для безопасной эксплуатации станции. Некоторые полезные комментарии по RIM даны в [87].

Объемы НК при изготовлении оборудования и трубопроводов MMP/АСММ, возможно, следует увеличить относительно показателей в [72]. Стоимость проведения НК в условиях изготовления и монтажа в разы ниже, чем стоимость проведения НК в процессе эксплуатации, в особенности, в удаленных районах. Поэтому объемы НК предлагается заимствовать из зарубежных стандартов [88].

Представляется необходимым учесть последние наработки зарубежных коллег при развитии нормативной базы для MMP/АСММ в России с учетом специфики MMP/АСММ.

2.3. Применение цифровых технологий

Цифровые технологии являются составной частью концепции Госкорпорации «Росатом» по устойчивому развитию АЭ в России [89]. Поставлены задачи развития в отрасли современной цифровой среды через создание цифровых продуктов и решений, повышению эффективности процессов внутри отрасли и на территориях присутствия в России и на зарубежных рынках.

Для реализации перечисленных задач силами предприятий отрасли намечены пути внедрения цифровых технологий [90-91], в том числе, при сооружении АЭС [92].

В связи с развитием современных информационных технологий расширяется использование технологий компьютерного моделирования при решении задач разработки, производства и обеспечения эксплуатации изделий. Компьютерные модели становятся одной из форм представления результатов проектно-конструкторской деятельности. При этом одновременно возрастает роль компьютерного моделирования

как альтернативы физическим испытаниям, позволяющего существенно сократить затраты на испытания в ходе создания изделий.

Специалисты ФГАОУ ВО СПбПУ принимали участие в разработке национального стандарта в области компьютерных моделей и моделирования, устанавливающего общие положения разработки и применения цифровых двойников изделий [93]. В рамках IV Международного форума «Передовые цифровые и производственные технологии» (далее – Форум) [94] проведен первый в России образовательный онлайн-курс, посвященный разработке и применению технологии цифровых двойников (Digital Twins) в высокотехнологичной промышленности в полном соответствии со вступившим в силу 1 января 2022 года национальным стандартом [93]. На сайте Форума представлены основные итоги его работы [94].

С учетом ожидаемых сроков эксплуатации большинства энергоблоков АЭС России в 60 лет (а возможно, и более) приоритетной задачей представляется создание цифрового двойника (ЦД) каждого энергоблока АЭС, в том числе, для накопления информации в процессе эксплуатации по техническому состоянию СКЭ и параметрам радиационной обстановки в производственных помещениях. Ввиду большой вариативности понятия ЦД [90] представляется реалистичным создание ЦД для АЭС, как было предложено в [94-98].

Для проектов ММР/АСММ представляется возможным применение технологии ЦД на ранних стадиях разработки (в том числе, для оптимизации затрат на испытания в ходе создания изделий), а также в целях дистанционного сопровождения эксплуатации объекта, расположенного в удаленных регионах страны, рис.1.

3. Заключение

Для регионов с децентрализованным энергообеспечением в ближайшие 10–20 лет представляется выполнимым оснащение надежными источниками энергоснабжения на базе АСММ (с учетом широкого спектра мощностей АСММ, предлагаемых к разработке).

Ключевыми вопросами для практического применения АСММ являются: (1) обеспечение ядерной и радиационной безопасности и (2) конкурентоспособность на базе современных технологий изготовления конструкций, систем и элементов АСММ, а также информационных технологий.

Стоимостные показатели проекта АСММ будут в существенной степени зависеть от требований заказчика к сроку службы и уровню мощности. Возможно, что для АСММ не будет стоять задача по долгосрочной эксплуатации в 60 и более лет ввиду ускоренного технологического развития и возможности замещения АСММ на той же площадке более конкурентоспособными инновационными решениями.

Одним из базовых вопросов при разработке проектов АСММ является учет возможных механизмов старения на базе рекомендаций МАГАТЭ, применение современных систем НК, прошедших оценку соответствия, и систем мониторинга в целях раннего выявления и предупреждения отказов.

Применение технологий цифровых двойников позволит оптимизировать проектирование ММР/АСММ, а также обеспечить удаленное сопровождение их эксплуатации.

Список литературы

- 1 US NRC. TMI-2 Lessons Learned Task Force. Final Report. NUREG-0585, October 1979.
- 2 Информация об аварии на Чернобыльской АЭС и ее последствиях, подготовленная для МАГАТЭ. Журнал «Атомная энергия», Том 65, выпуск 5, 1986.
- 3 IAEA. The safety of nuclear power: strategy for the future (Proceedings of the Conference held in 1991; published in 1992).
- 4 IAEA. Summary report on the post-accident review meeting on the Chernobyl accident. 75-INSAG-1, 1986.
- 5 IAEA. The Chernobyl accident: Updating of INSAG-1. 75-INSAG-7, 1993.
- 6 IAEA. Basic safety principles for nuclear power plants. 75-INSAG-3, 1988.
- 7 IAEA. Safety culture. 75-INSAG-4, 1991.
- 8 IAEA. Defense in depth in nuclear safety. INSAG-10, 1996.
- 9 IAEA. Safety Aspects of Nuclear Power Plant Ageing (State of the Art Report), IAEA-TECDOC-540, Vienna, 1990.
- 10 IAEA. Methodology for the Management of Ageing of Nuclear Power Plant Components Important to Safety. Technical Reports Series No.338, Vienna, 1992.
- 11 IAEA. Implementation and review of a nuclear power plant ageing management programme, Safety reports series No. 15, 1999.
- 12 IAEA-TECDOC-574. Use of Nuclear Reactors for Seawater Desalination, 1990.
- 13 IAEA-TECDOC-666. Technical and economic evaluation of potable water production through desalination of seawater by using nuclear energy and other means, 1992.
- 14 IAEA. Design Measures to Facilitate Implementation of Safeguards at Future Water Cooled Nuclear Power Plants. Technical Report Series 392, 1998.
- 15 IAEA. Advances in Heavy Water Reactor Technology. IAEA-TECDOC-984, 1998.
- 16 IAEA. Advances in Fast Reactor Technology. IAEA-TECDOC 1015, 1998.
- 17 IAEA. High Temperature Gas Cooled Reactors Technology Development. IAEA-TECDOC-988, 1997.
- 18 IAEA. Thorium Based Fuel Options for the Generation of Electricity: Developments in the 1990s. IAEA-TECDOC-1155, 2000.
- 19 IAEA. Guidance for Preparing User Requirements Documents for Small and Medium Reactors and Their Application. IAEA-TECDOC-1167, 2000.
- 20 IAEA. Current Status and Future Development of Modular High Temperature Gas Cooled Reactor Technology. IAEA-TECDOC-1198, 2001.
- 21 IAEA. Accelerator driven systems: Energy generation and transmutation of nuclear waste. Status report. IAEA-TECDOC-985, 1997.
- 22 OECD-NEA. Workshop on Advanced Nuclear Reactor Safety Issues and Research Needs (Paris, France, 18-20 February 2002). Co-sponsored by the International Atomic Energy Agency and Organized in collaboration with the European Communities/
- 23 A Technology Roadmap for Generation IV Nuclear Energy Systems. Issued by the U.S. DOE Nuclear Energy Research Advisory Committee and the Generation IV International Forum, December 2002.
- 24 OECD, IEA. Innovative Nuclear Reactor Development. Opportunities for International Co-operation, 2002.

- 25 Атомные станции малой мощности: новое направление развития энергетики / под ред. акад. РАН А. А. Саркисова ; Ин-т проблем безопасного развития атомной энергетики РАН. — М. : Наука, 2011. — 375 с. : ил.
- 26 В. А. Сидоренко. Задачи, проблемы и возможности создания атомной энергетики малых мощностей // Межотраслевая межрегиональная научно-техническая конференция «Перспектива развития системы атомных станций малой мощности в регионах, не имеющих централизованного электроснабжения». Москва, Россия, 11–12 ноября 2010 года.
- 27 Б. Г. Санеев, И. Ю. Иванова, Т. Ф. Тугузова, М. И. Франк. Роль атомных станций малой мощности в зонах децентрализованного энергоснабжения на востоке России // Межотраслевая межрегиональная научно-техническая конференция «Перспектива развития системы атомных станций малой мощности в регионах, не имеющих централизованного электроснабжения». Москва, Россия, 11-12 ноября 2010 года.
- 28 Атомные станции малой мощности: новое направление развития энергетики : Т. 2 /под ред. акад. РАН А. А. Саркисова. — М. : Академ-Принт, 2015. — 387 с. : ил.
- 29 В.Г. Асмолов. Стратегия 2018 // Пленарный доклад на 11-й международной научно-технической конференции «Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР». Подольск, Россия, 21-24 мая 2019.
- 30 OECD-NEA. Current Status, Technical Feasibility and Economics of Small Nuclear Reactors, June 2011.
- 31 IAEA. Status of Small Reactor Designs Without On-site Refuelling. IAEA-TECDOC-1536, January 2007.
- 32 IAEA. Advanced Small and Medium Sized Reactors – Design Status and Trends, Deployment Opportunities, and Challenges (Prepared by Vladimir Kuznetsov) // IAEA/ICTP Workshop, Trieste, 3 14 May 2010.
- 33 IAEA. Technology Roadmap for Small Modular Reactor Deployment, IAEA Nuclear Energy Series No. NR-T-1.18, IAEA, Vienna (2021)
- 34 IAEA, Standards Series No. SSR-2/1 (Rev. 1), Safety of Nuclear Power Plants: Design, IAEA Safety, IAEA, Vienna (2016).
- 35 IAEA Safety Standards Series No. NS R 3, Site Evaluation for Nuclear Installations
- 36 IAEA Safety Standards Series No. SSR 2/2 (Rev. 1), Safety of Nuclear Power Plants: Commissioning and Operation.
- 37 J.Jenkins and S.Mansur. “Bridging the Clean Energy Valleys of Death”. Breakthrough Institute, November 2011.
- 38 M. Hadid Subki, Frederik Reitsma. Advances in Small Modular Reactor Design and Technology Development for Near-term Deployment / ESI-CIL Nuclear Governance Project Conference, Singapore, 8th November 2017.
- 39 Tractebel’s vision on Small Modular Reactors (White Paper), December 2020.
- 40 ADVANCES IN SMALL MODULAR REACTOR TECHNOLOGY DEVELOPMENTS. 2022 Edition. A Supplement to: IAEA Advanced Reactors Information System (ARIS) <http://aris.iaea.org>
- 41 China gives green light to nuclear reactor that burns thorium – a fuel that could power the country for 20,000 years. <https://www.scmp.com/news/china/science/article/3224183/china-gives-green-light->

[nuclear-reactor-burns-thorium-fuel-could-power-country-20000-years?utm_source=rss_feed](#)

- 42 R.K. Sinha, A. Kakodkar. Design and development of the AHWR—the Indian thorium fuelled innovative nuclear reactor. Nuclear Engineering and Design 236 (2006) 683–700.
- 43 IAEA. Small Modular Reactors: A new nuclear energy paradigm. Pre-print, 2022 .
- 44 Camarcat N. Sustainable Nuclear Energy Technology Platform / 15th INPRO Dialogue Forum – 3 July 2018, Vienna, Austria.
- 45 OECD. SNETP Strategic Research and Innovation Agenda. July 2021.
- 46 OECD. European SMR pre-Partnership-WS1 MarketAnalysis. FinalReport, July 2023.
- 47 EDF begins permitting process for two new reactors at Penly / <https://www.world-nuclear-news.org/Articles/EDF-begins-permitting-process-for-two-new-reactors>
- 48 Tractebel to conduct Nuward SMR conceptual design studies / <https://www.world-nuclear-news.org/Articles/Tractebel-to-conduct-Nuward-SMR-conceptual-design>
- 49 Tractebel strengthens collaboration in Nuward SMR project / <https://www.neimagazine.com/news/newstractebel-strengthens-collaboration-in-nuward-smr-project-10959201>
- 50 Finnish SMR targets district heating market / <https://www.world-nuclear-news.org/Articles/Finnish-SMR-targets-district-heating-market>
- 51 Polish government approves first nuclear power plant / <https://www.world-nuclear-news.org/Articles/Polish-government-approves-first-nuclear-power-pla>
- 52 Fermi Energia выбрала малый модульный реактор BWRX-300 от GE Hitachi для строительства в Эстонии / <https://www.atomic-energy.ru/news/2023/02/08/132583>
- 53 OECD. The NEA Small Modular Reactor Dashboard, NEA No. 7650, 2023.
- 54 Быстрый реактор БН-800 Белоярской АЭС впервые выведен на 100% уровень мощности с полной загрузкой инновационным МОКС-топливом / <https://www.atomic-energy.ru/news/2022/09/23/128562?ysclid=lko8zy2s5c793345364>
- 55 Единственная в мире плавучая атомная теплоэлектростанция введена в промышленную эксплуатацию / <https://www.atomic-energy.ru/news/2020/05/22/103920?ysclid=lko93uoqfq347367521>
- 56 Началось строительство опытного реактора на быстрых нейтронах БРЕСТ / <https://nplus1.ru/news/2021/06/09/brest-now?ysclid=lko97z6d2r82592347>
- 57 Госкорпорация «Росатом». НИКИЭТ завершил разработку эскизного проекта установки с исследовательским жидкосольевым реактором. Информация от 28 Декабря, 2022. <https://www.rosatom.ru/journalist/news/nikiet-zavershil-razrabotku-eskiznogo-proekta-ustanovki-s-issledovatel'skim-zhidkosolevym-reaktorom/>
- 58 Technology Roadmap Update for Generation IV Nuclear Energy Systems. Issued by the OECD Nuclear Energy Agency for the Generation IV International Forum, January 2014.
- 59 Киселев Г.В., Конев В.Н. История реализации ториевого режима в советском Атомном проекте / «Успехи физических наук», 2007, том 177, № 12, с. 1361–1384.
- 60 E. S. Bettis, R. C. Robertson (1970), The Design and Performance Features of a Single-Fluid Molten-Salt Breeder Reactor, Nucl. App. and Tech. 8, 190-207.
- 61 Alex Galperin, Paul Reichert and Alvin Radkowsky. Thorium Fuel for Light Water Reactors—Reducing Proliferation Potential of Nuclear Power Fuel Cycle. Science & Global Security, 1997, Volume 6, pp.265-290.

- 62 WO 03/001534 A1. Международная заявка на патент «Способ управления ториевым ядерным реактором и тепловыделяющая сборка для его осуществления» Автор Максимов Л.Н. Дата международной публикации 03.01.2003.
- 63 Victor Ignatiev. MOLten SALT ACTINIDE RECYCLER & TRANSFORMING SYSTEM WITH AND WITHOUT TH-U SUPPORT: MOSART. International Forum GENERATION-IV. 2018-06-07.
- 64 IAEA. Nuclear Power Reactors in the World, Reference Data Series No.2, 2022.
- 65 Чирков И.В. Ядерная энергетика и ресурсы тория. Атомная энергия. Том 30, вып. 6 (июнь 1971), С.527-533.
- 66 АО «НПО «ЦНИИТМАШ». Программа V Международной научной конференции «Сварка и родственные технологии для изготовления оборудования специального и ответственного назначения» (Москва, 23-25.05.2023).
- 67 Сборник тезисов докладов V Международной научной конференции «Сварка и родственные технологии для изготовления оборудования специального и ответственного назначения». М.: АО «НПО «ЦНИИТМАШ».
- 68 Федеральный проект № 4 «Разработка новых материалов и технологий для перспективных энергетических систем» (U4) / <https://naukarosatom.ru/projects/federalnyy-proekt-razrabotka-novykh-materialov-i-tekhnologiy-dlya-perspektivnykh-energeticheskikh-si/>
- 69 Паршин С.Г. «Концептуальные проблемы свариваемости и анизотропии сварных соединений высокопрочных хладостойких и криогенных сталей» (Доклад от ФГАОУ ВО «СПбПУ») // V Международной научной конференции «Сварка и родственные технологии для изготовления оборудования специального и ответственного назначения», Москва, Россия, 23–25 мая 2023 года.
- 70 Кузнецов М.В. «Лазерные и аддитивные технологии СПбПУ» (Доклад от ФГАОУ ВО «СПбПУ») // V Международной научной конференции «Сварка и родственные технологии для изготовления оборудования специального и ответственного назначения», Москва, Россия, 23-25 мая 2023 года.
- 71 НП-104-18. Сварка и наплавка оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок.
- 72 НП-105-18. Правила контроля металла оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок при изготовлении и монтаже.
- 73 НП-084-15. Правила контроля основного металла, сварных соединений и наплавленных поверхностей при эксплуатации оборудования, трубопроводов и других элементов атомных станций.
- 74 НП-096-15. Требования к управлению ресурсом оборудования и трубопроводов атомных станций. Основные положения.
- 75 Седьмой Национальный Доклад Российской Федерации о выполнении обязательств, вытекающих из Конвенции о ядерной безопасности, 2016.
- 76 ГОСТ Р 27.101-2021. Надежность в технике. Надежность выполнения задания и управление непрерывностью деятельности. Термины и определения
- 77 ГОСТ Р 27.102-2021. Надежность в технике. Надежность объекта. Термины и определения.
- 78 НП-089-15. Правила устройства и безопасной эксплуатации оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок.

- 79 НП-017-18. Основные требования к продлению срока эксплуатации блока атомной станции.
- 80 ПНАЭ Г-7-008-89. Правила устройства и безопасной эксплуатации оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок.
- 81 НП-017-00. Основные требования к продлению срока эксплуатации блока атомной станции, 2000.
- 82 А.И. Аржаев, А.А. Калютик, В.О. Маханев, В.С. Модестов. Об уроках старения элементов АЭС / В сборнике: Современные технологии и экономика в энергетике. Материалы международной научно-практической конференции. 2023. С.67–69.
- 83 НП-001-15. Общие положения обеспечения безопасности атомных станций.
- 84 ENIQ TGR Discussion document on the role of in-service inspection within the philosophy of defence in depth, ENIQ Report nr. 29, EUR 22230 EN, Luxembourg, 2007.
- 85 ASME Code, Section XI, Rules for Inservice Inspection of Nuclear Power Plant Components. Division 1. Rules for Inspection and Testing of Components of Light-Water-Cooled Plants, 2021.
- 86 ASME Code, Section XI, Rules for Inservice Inspection of Nuclear Power Plant Components. Division 2. Requirements for Reliability and Integrity Management (RIM) Programs for Nuclear Power Plants, 2021.
- 87 IAEA. Methodologies for Assessing Pipe Failure Rates in Advanced Water Cooled Reactors. No. NR-T-2.16, 2023.
- 88 Группа стандартов EN 13480. Трубопроводы промышленные металлические (Metallic industrial piping).
- 89 Госкорпорация «Росатом». Меморандум руководителей атомной отрасли о приверженности принципам устойчивого развития. Приложение № 1 к Приказу от 01.03.2022 № 1/235-П.
- 90 Прохоров А., Лысачев М. Научный редактор профессор Боровков А. Цифровой двойник. Анализ, тренды, мировой опыт. Издание первое, исправленное и дополненное. – М.: ООО «АльянсПринт», 2020. – 401 стр., ил.
- 91 Прохоров А., Коник Л. Цифровая трансформация. Анализ, тренды, мировой опыт. Издание второе, исправленное и дополненное. — М.: ООО «КомНьюс Груп», 2019. — 368 стр., ил. (правки внесены 22 июля 2022 г.).
- 92 Ребергер А.М., Метс А.А. Информационная поддержка процессов капитального строительства / 11-я Международная научно-техническая конференция «Безопасность, эффективность и экономика атомной энергетики» – МНТК-2018 (г. Москва, Россия, 23–24 мая 2018 г.).
- 93 ГОСТ Р 57700.37–2021 «Компьютерные модели и моделирование. ЦИФРОВЫЕ ДВОЙНИКИ ИЗДЕЛИЙ. Общие положения».
- 94 Четвертый международный форум «Передовые цифровые и производственные технологии»: события и основные итоги / <https://npt-forum.ru/itogi2022>
- 95 ФГАОУ ВО СПбПУ. Письмо от 23.12.2019 исх.№ ОД-21-6-1175.
- 96 Антонов М.И., Аржаев А.И., Аржаев К.А., Денисов И.Н., Калютик А.А., Карякин Ю.Е., Маханев В.О. О цифровом двойнике блока атомной станции в рамках управления жизненным циклом / В сборнике: Современные технологии и экономика в энергетике (МТЭЕ – 2020). Материалы международной научно-практической конференции. 2020. С. 69-71.
- 97 Antonov Mikhail, Arzhaev Alexander, Arzhaev Alexey, Arzhaev Kirill, Denisov Ilya, Emelianov Anton, Kalyutik Aleksander, Karyakin Yuri, Kurakin Maksim, Lyashenko Daniil, Makhanev Valentin. NPP Unit Life Management based on Digital Twin Application / E3S Web of Conferences 209, 03006 (2020) <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202020903006>.

- 98 Аржаев А.А., Аржаев А.И., Калютик А.А., Маханев В.О., Модестов В.С. О методологии обеспечения заданных показателей готовности энергоблоков АС с использованием цифровых двойников / IX Международная Конференция СРТ2022 (г. Пущино, Россия, 16-20 мая, 2022)
http://digital-economy.ru/images/easyblog_articles/962/CPT2022_paper_8-rus.pdf