

О лицензировании технологии малых модульных реакторов

Дыбач А. М.

Государственное предприятие

«Государственный научно-технический центр по ядерной и радиационной безопасности», г. Киев, Украина

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1807-8514>

Плачков Г.И.

Государственная инспекция ядерного регулирования

Украины, г. Киев, Украина

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5971-2342>

В последнее время в мире наблюдается устойчивый рост заинтересованности в технологии малых модульных реакторов (ММР). ММР рассматриваются как перспективное направление дальнейшего развития ядерной энергетики. В статье дано определение термина «малый модульный реактор», представлены область применения, потенциальные преимущества и недостатки ММР. Выполнен обзор и предложена классификация проектов ММР в зависимости от новизны их технических решений. С целью выявления особенностей ММР на которые следует обратить внимание при лицензировании, выполнен укрупненный сравнительный анализ отдельных технических решений ММР (на примере проекта SMR-160 Holtec International) с действующими в Украине АЭС. Соотнесены отдельные специфические проектные решения SMR-160 с уровнями глубоководной защиты. Проанализированы подходы и состояние лицензирования проектов ММР в международной практике. Идентифицированы проблемные аспекты в части нормативного обеспечения и подтверждения эффективности проектных решений ММР. Сформулированы предложения и рекомендации по первым шагам для обеспечения процесса лицензирования в ответ на инициативу эксплуатирующей организации ГП НАЭК «Энергоатом».

Ключевые слова: малые модульные реакторы, пассивные системы, анализ безопасности, лицензирование.

© Дыбач А. М., Плачков Г.И. 2019

Малые модульные реакторы (далее — ММР) являются современным трендом в ядерной отрасли. Технология ММР рассматривается как перспективное направление дальнейшего развития ядерной энергетики в условиях возрастающей конкуренции с другими видами генерации электроэнергии с учетом стоимостных и временных факторов, а также ужесточающихся регулирующих требований по безопасности АЭС. В некоторых странах работы по созданию ММР ведутся более интенсивно чем по реакторам АЭС большой мощности (1000–1600 МВт). В Канаде принята Дорожная карта по малым модульным реакторам [1], о перспективах внедрения технологии ММР заявили США, Великобритания, Китай, Российская Федерация [2]. Эксплуатирующая организация ГП НАЭК «Энергоатом» также рассматривает перспективы использования технологии ММР (проект SMR-160 Holtec International), в том числе в качестве потенциального замещения энергоблоков АЭС после завершения их долговременной эксплуатации [3]– [5].

В соответствии с классификацией МАГАТЭ [6], к малым принято относить реакторы электрической мощностью до 300 МВт. Этот уровень мощности был переходным в процессе развития ядерной энергетики и соответствует первым проектам АЭС (BWR, PWR, PHWR), такой уровень мощности ядерных реакторов также характерен для морских транспортных средств [2]. Однако, определяющий смысл, который вкладывается в термин «малые модульные реакторы», состоит не в их мощности. Речь идет о сугубо коммерческих и модульных конструкциях, которые отличаются особой компоновкой основного оборудования, способом его изготовления и доставки, а также позволяют предложить заказчику широкий диапазон мощности станции, набираемой из разного числа модулей [7]. Часто также вместе с термином ММР в документах МАГАТЭ употребляется прилагательное «усовершенствованные» (англ. «advanced») чтобы подчеркнуть, что в проекте ММР учитывается опыт и улучшения предыдущих проектов АЭС.

Цель данной статьи акцентировать внимание читателя на технических и экономических особенностях ММР, а также определить первоочередные шаги в направлении обеспечения лицензирования ММР в Украине.

Область применения, потенциальные преимущества и недостатки ММР

Можно выделить два основных сегмента рынка для применения технологии ММР [8]:

1. Удаленные или изолированные регионы, для которых использование больших электрогенерирующих мощностей не требуется, недостаточны или отсутствуют электрические сети, либо определяющим является их применение для других целей, кроме производства электроэнергии (опреснительные установки, теплоснабжение). Не характерно для условий Украины.

2. Альтернатива АЭС большой мощности. Капитальные затраты на один энергоблок ММР и ожидаемая длительность строительства ММР существенно меньше чем больших АЭС, что, несмотря на сопоставимую стоимость в пересчете на кВт мощности, обуславливает более низкие финансовые риски и лучшие условия возврата инвестиций.

ММР обладают следующими потенциальными преимуществами, которые определяют их стремительное развитие в последнее время:

Таблица 1. Изменение стоимости и срока сооружения новых АЭС поколения III+ в западных странах (данные из открытых источников по состоянию на 31.12.2018 г. [9], [10])

Название АЭС/Проект	Первоначальная стоимость	Уточненная стоимость	Задержка ввода эксплуатацию
Олкилуото 3 (Финляндия) / EPR-1600	3 млрд. €	8,5 млрд. €.	2009 → 2019
Фламанвиль (Франция) / EPR-1600	3,3 млрд. €	10,9 млрд. €.	2012 → 2019
АЭС Хинкли-Пойнт С (Великобритания) / UK EPR (EPR-1750)	18,1 млрд. £*	19,6 млрд. £*	2023 → 2025 (первый энергоблок)
Ханхикиви (Финляндия) / ВВЭР-1200 (АЭС-2006)	6,5–7 млрд. €	-	2024 → 2028

* — стоимость указана для 2-х энергоблоков АЭС

1. Модульный принцип, который обеспечивает серийность производства, возможность полного заводского изготовления модуля и его доставки на площадку АЭС (в т. ч. железнодорожным транспортом). Заводское изготовление также позволяет применять более высокие стандарты качества (например, контроль качества сварных соединений).

2. Высокий уровень внутренней само защищенности и широкое использование пассивных систем, что позволяет пересмотреть (уменьшить) набор технологических систем, важных для безопасности, работающих в режиме ожидания, необходимых для традиционных типов АЭС, и как следствие удешевляет ММР (следует отметить, что в современных проектах больших АЭС поколения III+ AP-1000, EPR-1600, АЭС-2006 также расширен перечень пассивных систем);

3. Работа в режиме отслеживания мощности (маневрирование мощностью), что позволяет совмещать ММР с другими, в том числе и возобновляемыми источниками электроэнергии.

4. Более высокая защищенность ММР по отношению к внешним экстремальным воздействиям природного и техногенного характера (в отдельных проектах предусматривается подземное размещение реакторной установки ММР).

К потенциальным недостаткам ММР можно отнести:

1. Отсутствие референтности и апробации технологии ММР практическим опытом эксплуатации (характерно для всех новых проектов АЭС).

2. Высокие регуляторные риски (в том числе, обусловленные отсутствием специфических для ММР нормативных требований по безопасности).

3. Проявление экономического эффекта только при серийном сооружении ММР.

4. Необходимость выполнения экспериментальных и расчетно-аналитических исследований для подтверждения эффективности технических решений ММР в части пассивных систем для условий нормальной эксплуатации, проектных и за проектных (расширенных проектных) аварий.

Отдельно следует отметить, что возросший интерес к ММР обусловлен и трудностями сооружения новых АЭС поколения III+, которые наглядно подтверждаются данными в Таблице 1.

В виду отсутствия опыта практической реализации новых проектов ММР*, в настоящее время не существует достоверных данных по стоимости ММР. В отчете OECD [8] отмечается, что удельные капитальные затраты ММР (стоимость 1 кВт установленной мощности) будут выше, чем для больших АЭС, но в связи с меньшей мощностью, начальные капитальные затраты и срок реализации — существенно ниже. По доступным данным поставщиков

* По состоянию на 2018 г. в стадии сооружения/ввода в эксплуатацию три проекта ММР: НТН-РМ (Китай), CAREM (Аргентина) и КЛТ-40С (Российская Федерация) (модификация КЛТ-40М устанавливалась на ледоколах «Таймыр» и «Вайгач»)

технологии ММР, длительность реализации (с момента начала строительства до ввода в эксплуатацию) пилотного проекта ММР (в англоязычной терминологии — first-of-a-kind (FOAK)) составляет 2–4 года, последующих (n-th-of-a-kind (NOAK)) — 1–2 года. Стоимость пилотного (FOAK) ММР на 15–55 % выше, чем последующих серийных (NOAK) ММР [8].

Факторы, влияющие на снижение стоимости ММР, качественно представлены на рисунке 1 [10].

При оценке стоимости ММР следует учитывать следующее множество факторов, являющихся преимущественными по отношению к большим АЭС:

1. Опыт сооружения — освоение технологии и накопление опыта изготовления оборудования, строительства и ввода в эксплуатацию ММР, серийное производство модульных конструкций (оценочное снижение стоимости до 10 % после реализации 3–5 проектов ММР, данный фактор также в меньшей мере характерен и для больших АЭС);

2. Проектные особенности — оптимизированные проектные решения и набор (количество) технологических систем ММР, обусловленные пассивным принципом и свойством внутренней само защищенности ММР;

3. Модульность — изготовление модульных конструкций в заводских условиях, параллельное выполнение работ, меньшее количество персонала на площадке, более высокие стандарты качества;

4. Многоблочность — совместное использование инфраструктуры площадки, зданий и сооружений, систем и персонала для нескольких ММР;

5. Длительность сооружения — более краткие (по сравнению с большими АЭС) сроки строительства ММР обеспечивают более раннее начало возврата инвестиций и сокращение стоимости строительных и пусконаладочных работ на площадке.

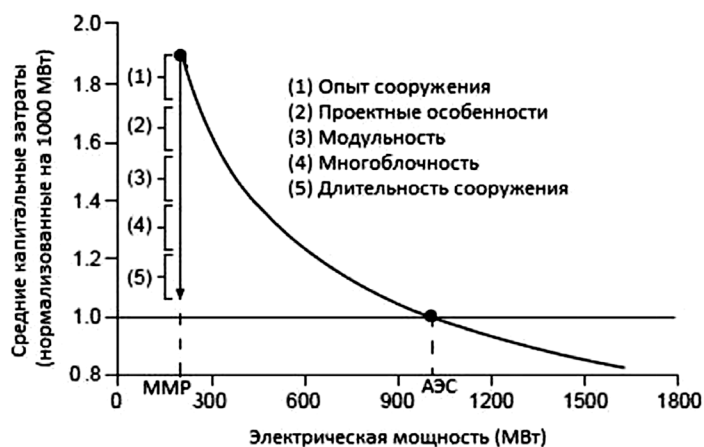


Рис. 1. Соотношение стоимости ММР и АЭС с учетом снижающих стоимость факторов для ММР

Проектные особенности ММР

По данным информационной системы МАГАТЭ ARIS по состоянию на сентябрь 2018 года в стадии разработки находятся более 50 проектов ММР. Отчет [11] содержит основные проектные характеристики ММР.

В виду многообразия проектов ММР можно предложить упрощенную классификацию ММР на основании новизны их проектных решений (см. Таблица 2).

В таблице 3 представлено сравнение проектных средств серийного энергоблока АЭС с ВВЭР-1000/В-320 и эволюционного проекта ММР SMR-160, планируемого

Таблица 2. Упрощенная классификация и отдельные проектные характеристики представительных проектов ММР (на основании данных [11])

Проектный параметр	Класс проектов ММР				
	Эволюционный			Инновационный	Революционный
	Легководные			Газоохлаждаемые	Жидкометал. / жидкосольевые
	NuScale	SMR-160	SMART	HTR-PM	BREST
Тепл./эл. мощность (МВт)	160/50	525/160	330/100	2x250/210	700/300
Теплоноситель/ замедлитель	вода			гелий/графит	свинец
Циркуляция теплоносителя	естественная		принуд.	принуд.	принуд.
Спектр нейтронов	тепловой			тепловой	быстрый
Обогащение топлива (%)	< 4.95	< 4.95	<5	8.5	13.5
Давление в контуре (МПа)	12.8	15.5	15	7	низкое (нет данных)
Температура вх/вых (°С)	258/314	209/321	296/323	250/750	420/535
Тип систем безопасности	пассивные			комбинация активных и пассивных	пассивные

Таблица 3. Сравнение проектных решений ВВЭР-1000/В-320 и ММР SMR-160 по выполнению функций безопасности

Функция безопасности	Проектные решения	
	Проект PWR (на примере ВВЭР-1000/В-320)	Эволюционный проект ММР (на примере SMR-160) [11]
Управление реактивностью (аварийный останов)	<p>Две системы воздействия на реактивность, основанные на разных принципах:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Механическое перемещение поглощающих стержней в активной зоне. 2. Изменение концентрации борной кислоты в теплоносителе (система аварийного впрыска бора высокого давления TQ14,24,34). 	<p>Для компенсации кратковременных изменений реактивности:</p> <p>- поглощающие пластины (крестообразные) с механико-электрическим приводом.</p> <p>Отсутствует борное регулирование.</p>
Аварийный отвод тепла	<ol style="list-style-type: none"> 1. Пассивная система охлаждения активной зоны (YT11,12,13,14). 2. Системы аварийного охлаждения активной зоны (TQ12,22,32, TQ13,23,33). 3. Система защиты первого контура от превышения давления (YP). 4. Система аварийного газоудаления (YR). 5. Система аварийной подачи питательной воды в парогенераторы (TX10,20,30). 6. Система защиты второго контура от превышения давления (TX50,60,70,80) + БРУ-А. 	<p>Пассивная система на основании естественной циркуляции, гравитации, расширения сжатого газа без использования активных компонентов (например, насосов), которая состоит из 4-х подсистем:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Система отвода тепла по первому контуру (PDHR); 2. Система отвода тепла по второму контуру (SDHR); 3. Система автоматического снижения давления (ADS); 4. Пассивная система подпитки активной зоны (PCMWS).
Локализация радиоактивных веществ	<ol style="list-style-type: none"> 1. Система герметичного ограждения. 2. Спринклерная система (TQ11,21,31) <p>Пост — фукусимские мероприятия:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Система принудительного фильтруемого сброса давления в ГО. 2. Система обеспечения водородной безопасности. 3. Система удержания расплава в пределах герметичного ограждения. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Система герметичного ограждения (часть ГО ниже нулевой отметки). 2. Система пассивного отвода тепла от герметичного ограждения (PCHR) (обеспечивает теплоотвод до 3-х месяцев).

Таблица 4. Сопоставление проектных решений SMR-160 с уровнями ГЭЗ

Уровень ГЭЗ	Цель	Проектное решение SMR-160	Влияние на ГЭЗ
Уровень 1	Предотвращение нарушений нормальной эксплуатации	Отсутствие системы борного регулирования	Исключение возможности возникновения событий с непреднамеренным вводом положительной реактивности за счет разбавления бора
		Компактная модульная компоновка	Снижение вероятности событий с течами (LOCA)
		Естественная циркуляция при нормальной эксплуатации	Исключение событий с потерей циркуляции теплоносителя
Уровень 2	Предотвращение аварийных ситуаций	Улучшенный человеко-машинный интерфейс, отсутствие необходимости в действиях персонала	Снижение вероятности ошибки персонала
Уровень 3	Управление проектными авариями	Пассивные системы теплоотвода по первому и второму контуру	Большой временной запас на реализацию противоаварийных действий. Снижение зависимости от обеспечивающих систем.
Уровень 4	Управления расширенными проектными (за проектными) авариями		
Уровень 5	Аварийная готовность и реагирование	Технические средства на уровнях 1–4 обеспечивают более низкую частоту и активность радиоактивного выброса	Уменьшение размеров санитарно защитной зоны и зоны наблюдения.

к реализации в Украине [3], по выполнению основных функций безопасности.

В Таблице 4 представлены сопоставление отдельных специфических проектных решений SMR-160 с уровнями глубокоэшелонированной защиты (далее – ГЭЗ) и оценка их влияния на ГЭЗ.

Целью выполненного выше сравнительного анализа является идентификация проектных особенностей

эволюционных проектов ММР, которые отличаются от эксплуатируемых в настоящее время в Украине АЭС с ВВЭР, для того чтобы обратить на них внимание при обосновании безопасности и лицензировании ММР. Также следует учитывать, что проект SMR-160 сейчас находится на концептуальной стадии, технические решения и выполненные оценки безопасности являются предварительными.

Таблица 5. Состояние лицензирования ММР

Проект ММР/Разработчик технологии	Лицензирование ММР			
	Регулирующий орган/Страна	Этап лицензирования	Дата подачи материалов	Ожидаемый срок завершения рассмотрения
NuScale / NuScale Power, LLC	NRC/США	Сертификация проекта (Design Certification)	январь 2017 г.	2020 г.
	CNSC/Канада	Оценка проекта поставщика (Vendor Design Review)	апрель 2019 г. (фаза 1–2, подписано соглашение о рассмотрении)	2022 г.
SMR-160 / SMR Inventec, LLC, Holtec International Company	CNSC/Канада	Оценка проекта поставщика (Vendor Design Review)	июль 2018 г. (фаза 1)	2020 г.
	NRC/США	Пред-заявительное рассмотрение (Pre-Application)	-	-
Проект не определен (2 и более ММР, мощность до 800 МВт эл.) / Clinch River Nuclear Site Tennessee Valley Authority (TVA)	NRC/США	Раннее согласование площадки (Early Site Permit Application)	декабрь 2016 г.	2019 г. (заключение по оценке влияния на окружающую среду)
UK SMR / Rolls-Royce	ONR/ Великобритания	Оценка общего проекта (Generic Design Assessment)	-	2023 г. (ожидания заявителя Rolls-Royce)

Состояние лицензирования ММР в мире

Лицензирование технологии ММР находится на начальном этапе, что создает определённые лицензионные риски и приводит к увеличению временных и финансовых затрат на сооружение пилотного (FOAK) ММР.

В результате обзора открытой информации о деятельности регулирующих органов в странах с развитой ядерной энергетикой можно сделать вывод, что пред-лицензионные работы в формате предварительной сертификации/оценки проектов ММР ведутся в Канаде, США и Великобритании. Более детально эта информация представлена в таблице 5.

Для текущего состояния лицензирования ММР характерны следующие особенности:

- раннее вовлечения регулирующего органа, т.н. пред-лицензионный процесс (например, в CNSC данная деятельность регулируется документом GD-385 «Pre-licensing Review of a Vendor's Reactor Design» [12]) целью которого является определение потенциальной возможности дальнейшего лицензирования проекта ММР и таким образом снижение регуляторного риска;
- оценка проекта ММР без привязки к площадке АЭС (т.н. общий, унифицированный проект ММР);
- отсутствие специфических регуляторных требований для ММР, т. е. использование действующей нормативной базы по ядерной и радиационной безопасности с применением «дифференцированного подхода».

Актуальные вопросы лицензирования ММР в Украине

Готовность нормативной базы.

В Украине продолжается усовершенствование нормативной базы по ядерной и радиационной безопасности, что способствует реализации принципа «постоянного повышения безопасности». Основным достижением является замена предписывающих нормативных документов советских времен (ПНАЭ Г)* на более современные и целеориентированные национальные нормативно-правовые акты в соответствии со стандартами МАГАТЭ, а также продолжающаяся гармонизация с референтными уровнями Западно-европейской Ассоциации регулирующих органов (WENRA).

Для ММР не разработаны специфические международные требования, более того сформировалось мнение о возможности применения существующих требований для АЭС, в особенности в части принципов безопасности, с учетом специфики технологии ММР и использованием «дифференцированного подхода» [13] (англ. термин «graded approach», аналог отсутствует в национальной нормативной базе). Под «дифференцированным подходом» понимается зависимость уровня детализации обоснований безопасности, документации, процедур и прочей деятельности от потенциальной опасности объекта без ущерба для его безопасности. Дифференциальный подход фактически основывается на риск-информированном подходе и позволяет повысить эффективность деятельности как регулирующего органа, так и лицензиата без снижения безопасности ядерных установок.

* По состоянию на начало 2019 года на заключительной стадии находятся работы по разработке национальных нормативных документов взамен ПНАЭ Г-14-029-91 и ПНАЭ Г-7-008-89 (а также связанных с ним ПНАЭ Г по сварке, наплавке и т.д.).

Применение регулирующих требований для АЭС в полном объеме при лицензировании ММР представляется избыточным и может привести к искусственному созданию барьеров для ММР, вместе с этим, отдельные специфические для ММР аспекты требуют детализации. Таким образом, для нормативного обеспечения возможности лицензирования ММР в Украине, в качестве первого шага необходимо выполнить детальный анализ существующей национальной нормативной базы на предмет ее применимости для ММР. В этом анализе, в том числе, рекомендуется обратить внимание на следующие аспекты:

1. Реализация концепции глубокоэшелонированной защиты (далее – ГЭЗ). Для действующих АЭС, в особенности после аварии на АЭС Фукусима, основное внимание обращено на управление авариями (проектными и расширенными проектными авариями (за проектными авариями), в том числе тяжелыми авариями) на уровнях 3–5 ГЭЗ. В проектах ММР большее внимание уделяется уровням 1–2 ГЭЗ с целью предотвращения аварий за счет свойств само защищенности и пассивного принципа работы систем нормальной эксплуатации и, как следствие, ограничены предусматриваемые технические решения по предотвращению аварий на уровнях 3–4 ГЭЗ. Требуется анализ на предмет установления обоснованно достаточных требований к техническим средствам ММР по управлению авариями и смягчению их последствий.

2. Требования к системам безопасности. Например, в п. 8.2.9 НП 306.2.141–2008 [14], установлено требование о необходимости наличия двух независимых систем останова реактора, как минимум одна из них в полном объеме должна выполнять функцию аварийной защиты. Для ряда проектов ММР предполагается, что система аварийной защиты не требуется для предотвращения повреждения топлива вследствие внутренних свойств само защищенности. Как следствие, системы останова реактора для ММР классифицируются как системы нормальной эксплуатации, не влияющие на безопасность. Это так же характерно и для других технологических систем действующих АЭС, которые классифицированы как системы безопасности. Например, отвод тепла при нормальной эксплуатации, нарушениях нормальной эксплуатации, проектных и расширенных проектных (за проектных) авариях для ММР осуществляется пассивными средствами за счет естественной циркуляции, сил гравитации и без использования активных элементов. Требуется анализ классификации технологических и информационно-управляющих систем ММР, выполняющих функции безопасности, и определение обоснованно достаточных требований к этим системам.

3. Соблюдение организационно – технического принципа безопасности «применение апробированной инженерно-технической практики». Для отдельных проектных решений ММР (в особенности для инновационных и революционных проектов ММР по предложенной классификации в таблице 2) в настоящее время отсутствует апробация опытом эксплуатации, поэтому при лицензировании ММР следует основываться на экспериментальных либо расчетных данных.

Выполнение научно-исследовательских работ для повышения обоснованности регулирующих решений при лицензировании ММР

Для поддержки лицензионного процесса и повышения обоснованности регулирующих решений необходимо предусмотреть выполнение ряда научно-исследовательских

работ (далее – НИР), в том числе экспериментальных исследований, так как компьютерного моделирования может быть недостаточно. Основная цель НИР — выявить и охарактеризовать неопределенности, а также оценить эффективность проектных решений, основанных на свойствах внутренней само защищенности ММР и пассивного принципа работы технологических систем. Результаты НИР могут быть трансформированы в регулирующие требования, специфические для ММР.

Для наиболее перспективных для Украины эволюционных проектов ММР актуальными могут быть следующие тематики НИР:

- надежность пассивных систем: виды отказов, факторы и феномены приводящие к отказам, влияние окружающих условий на работу пассивных систем, вероятностная оценка надежности пассивных систем;
- исследование отдельных феноменов работы пассивных систем (процессы конденсации пара, стратификация жидкости, влияние неконденсируемых газов, учет различной геометрии и т. д.) [15];
- применимость существующих тепло гидравлических расчетных кодов для моделирования процессов в условиях естественной циркуляции;
- методология вероятностного анализа безопасности ММР (в особенности моделирование пассивных систем, надежность персонала);
- методология оценки безопасности мульти блочных модульных АЭС.

Выводы

Оценивая перспективу применения технологии ММР в Украине, следует отдать преимущество легководным (эволюционным) проектам ММР, технические решения которых используют накопленный опыт эксплуатации и анализа безопасности действующих АЭС с ВВЭР.

Международный опыт свидетельствует о положительной практике раннего вовлечения регулирующего органа в лицензионный процесс ММР. Для обеспечения возможности лицензирования ММР в Украине в качестве первого шага необходимо предусмотреть проведение анализа существующей национальной нормативной базы на предмет ее применимости для ММР с учетом проектных особенностей ММР и «дифференцированного подхода». По результатам анализа следует принять решение о необходимости разработки специальных регулирующих требований для ММР и/или определить область применения существующих нормативных документов.

Технические решения ММР в части пассивных систем требуют экспериментального и расчетно-аналитического подтверждения их эффективности, а существующие методы анализа безопасности — адаптации и дальнейшего развития.

Список использованной литературы

1. A Call to Action: A Canadian Roadmap for Small Modular Reactors. November 2018.
2. World Nuclear Association. Small Nuclear Power Reactors (Updated December 2018).
3. Енергоатом та Holtec підписали Меморандум про взаєморозуміння щодо співпраці у використанні малих модульних реакторів. URL: http://www.energoatom.kiev.ua/ua/press_cent-19.

4. Видання Національної атомної енергогенеруючої компанії «Енергоатом». №2(47). 2018. Енергоатом України. URL: http://www.energoatom.kiev.ua/uploads/others/magazine_2_47_2018.pdf.

5. Доклад «Унікальні можливості України для впровадження технологій SMR-160». URL: http://www.energoatom.kiev.ua/files/file/smr_160_for_naek_industry_forum_rus.pdf.

6. IAEA-TECDOC-1451. Innovative small and medium sized reactors: Design features, safety approaches and R&D trends. May 2005.

7. Аналитический обзор по малым модульным реакторам. По заказу журнала «Атомный эксперт». Апрель 2013 г. URL: http://atomicexpert-old.com/sites/default/files/ae%20%234_obzor_0.pdf

8. Current Status. Technical Feasibility and Economics of Small Nuclear Reactors. Nuclear Energy Agency. Organization of Economic Cooperation and Development. 2011.

9. URL: <http://www.world-nuclear-news.org>.

10. Economics and financing of small modular reactors (SMRs). Chapter December 2015. doi: <https://doi.org/10.1533/9780857098535.3.239>.

11. Advances in Small Modular Reactor Technology Developments A Supplement to: IAEA Advanced Reactors Information System (ARIS). 2018 Edition.

12. Canadian Nuclear Safety Commission GD-385: Pre-licensing Review of a Vendor's Reactor Design. June 2012.

13. IAEA-TECDOC-1785. Design Safety Considerations for Water Cooled Small Modular Reactors Incorporating Lessons Learned from the Fukushima Daiichi Accident.

14. НП 306.2.141-2008. «Загальні положення безпеки атомних станцій» (Інформація та документація).

15. Kaliatka A. Issues related to the safety assessment of the SMR concepts. Technical Meeting on Challenges in the Application of the Design Safety Requirements for Nuclear Power Plants to Small and Medium Sized Reactors. *Lithuanian Energy Institute*. 2017. Austria. Vienna.

References

1. A Call to Action: A Canadian Roadmap for Small Modular Reactors, November 2018.
2. World Nuclear Association. Small Nuclear Power Reactors (Updated December 2018).
3. Energoatom and Holtec Signed a Memorandum of Understanding on the Cooperation in Using Small Modular Reactors [Enerhoatom та Kholtek pidpysaly Memorandum pro vzaiemorozuminnia schodo spivpratsi u vykorystanni malykh modulnykh reaktoriv], available at: http://www.energoatom.kiev.ua/ua/press_cent-19. (Ukr)
4. Journal of the National Nuclear Energy Generating Company Energoatom [Vydannia Natsionalnoi atomnoi enerhoheneruiuchoi kompanii "Enerhoatom"], Edition No. 2(47), 2018, *Energoatom of Ukraine*, available at: http://www.energoatom.kiev.ua/uploads/others/magazine_2_47_2018.pdf. (Ukr)
5. Report on the Unique Possibilities of Ukraine to Implement SMR-160 Technologies [Doklad "Unikalnyie vozmozhnosti Ukrainy dlia vnedreniia tekhnologii SMR-160"], available at: http://www.energoatom.kiev.ua/files/file/smr_160_for_naek_industry_forum_rus.pdf. (Rus)
6. IAEA-TECDOC-1451. Innovative Small and Medium Sized Reactors: Design Features, Safety Approaches and R&D Trends, May 2005.
7. Analytical Review of Small Modular Reactors, on request of "Atomic Expert" Journal [Analiticheskii obzor po malym modulnym reaktoram. Po zakazu zhurnala "Atomnyi ekspert"], April 2013, available at: http://atomicexpert-old.com/sites/default/files/ae%20%234_obzor_0.pdf. (Rus)
8. Current Status. Technical Feasibility and Economics of Small Nuclear Reactors. Nuclear Energy Agency. Organization of Economic Cooperation and Development, 2011.
9. World Nuclear News Website, available at: <http://www.world-nuclear-news.org>.
10. Economics and Financing of Small Modular Reactors (SMRs), Chapter of December 2015, available at: <https://doi.org/10.1533/9780857098535.3.239>.

11. Advances in Small Modular Reactor Technology Developments A Supplement to: IAEA Advanced Reactors Information System (ARIS), 2018 Edition.

12. Canadian Nuclear Safety Commission GD-385: Pre-licensing Review of a Vendor's Reactor Design, June 2012.

13. IAEA-TECDOC-1785. Design Safety Considerations for Water Cooled Small Modular Reactors Incorporating Lessons Learned from the Fukushima Daiichi Accident.

14. NP 306.2.141-2008. General Safety Provisions of Nuclear Power Plants (Information and Documentation) [Zahalni polozhennia bezpeky atomnykh stantsii (Informatsiia ta dokumentatsiia)] (Ukr).

15. Kaliatka, A. (2017), "Issues Related to the Safety Assessment of the SMR Concepts", Technical Meeting on Challenges in the Application of the Design Safety Requirements for Nuclear Power Plants to Small and Medium Sized Reactors, *Lithuanian Energy Institute, Austria, Vienna*.

On Licensing the Technology of Small Modular Reactors

Dybach O¹.

¹State Enterprise "State Scientific and Technical Center for Nuclear and Radiation Safety", Kyiv, Ukraine

Plachkov H².

²State Nuclear Regulatory Inspectorate of Ukraine, Kyiv, Ukraine

There has been a steady growth of interest in the technology of small modular reactors (SMR) in the world recently. SMRs are considered as a promising area for the further development of nuclear industry. The paper defines the term "small modular reactor", presents the scope, potential advantages and disadvantages of SMR. A review was made and a classification of SMR projects was proposed depending on the novelty of their technical solutions. The paper presents an enlarged comparative analysis of individual SMR technical solutions (based on the example of Holtec International SMR-160) with operating Ukrainian NPPs to identify peculiarities of SMR that should be addressed in licensing. Certain specific design solutions of SMR-160 are correlated with defense-in-depth levels. The approaches and condition for licensing SMR designs in the international practice are analyzed. The paper identifies problematic aspects with regard to regulatory framework and confirmation of the efficiency of SMR design solutions, as well as formulates proposals and recommendations for the first steps to ensure the licensing process in response to the initiative of the operating organization Energoatom.

Key words: small modular reactors, passive systems, safety analysis, licensing.

Про ліцензування технології малих модульних реакторів

Дибач О. М.¹, Плачков Г. І.²

¹ Державне підприємство «Державний науково-технічний центр з ядерної та радіаційної безпеки», м. Київ, Україна

² Державна інспекція ядерного регулювання України, м. Київ, Україна

Останнім часом у світі спостерігається стійке зростання зацікавленості в технології малих модульних реакторів (ММР). ММР розглядаються як перспективний напрямок подальшого розвитку ядерної енергетики. У статті дано визначення терміна «малий модульний реактор», представлені область застосування, потенційні переваги і недоліки ММР. Виконано огляд і запропонована класифікація проектів ММР в залежності від новизни їх технічних рішень. З метою виявлення особливостей ММР на які слід звернути увагу при ліцензуванні, виконаний укрупнений порівняльний аналіз окремих технічних рішень ММР (на прикладі проекту SMR-160 Holtec International) з діючими в Україні АЕС. Співвіднесені окремі специфічні проектні рішення SMR-160 з рівнями глибокоешелонованого захисту. Проаналізовано підходи і стан ліцензування проектів ММР у міжнародній практиці. Ідентифіковано проблемні аспекти в частині нормативного забезпечення та підтвердження ефективності проектних рішень ММР. Сформульовано пропозиції та рекомендації щодо перших кроків для забезпечення процесу ліцензування у відповідь на ініціативу експлуатуючої організації ДП НАЕК «Енергоатом».

Ключові слова: малі модульні реактори, пасивні системи, аналіз безпеки, ліцензування.

Отримано 27.01.2019