

<https://doi.org/10.52676/1729-7885-2025-3-176-182>

УДК 629.039.58

НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ И ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЯДЕРНОЙ ФИЗИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ДЛЯ АТОМНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ НА БАЗЕ МАЛЫХ МОДУЛЬНЫХ РЕАКТОРОВ

А. В. Сысалетин^{1*}, В. В. Бакланов², В. А. Поспелов²

¹ РГП «Национальный ядерный центр Республики Казахстан», Курчатов, Казахстан

² Филиал «Институт атомной энергии» РГП НЯЦ РК, Курчатов, Казахстан

* E-mail для контактов: syssaletin@nnc.kz

В статье приводится рассмотрение подходов к обеспечению ядерной физической безопасности ядерных установок на базе малых модульных реакторов, а также методологии оценки эффективности систем физической защиты. Данные подходы основываются на принципах МАГАТЭ, учитывают законодательство Республики Казахстан и международный опыт по обеспечению безопасного функционирования ядерных установок на базе малых модульных реакторов.

Ключевые слова: ядерная физическая безопасность, малые модульные реакторы, оценка эффективности, физическая защита, вероятность обнаружения, ядерная установка.

ВВЕДЕНИЕ

При проектировании и строительстве ядерных установок, таких, как атомные электростанции, необходимо выполнить очень жесткие требования по безопасности, в частности, ядерной физической безопасности ядерной установки. Причиной существования данных требований является наличие угроз, характерных для объектов, представляющих собой ядерные установки, в частности, связанных с потенциальной возможностью хищений ядерного материала и саботажа, связанного с указанным материалом и ядерной установкой в целом.

Наличие глубокоэшелонированной защиты ядерной установки обуславливает необходимость значительных первоначальных капитальных затрат на ее проектирование и строительство, а также поддержание системы ядерной физической безопасности в постоянном работоспособном состоянии. Это негативно сказывается на стоимости конечного продукта – цене на киловатт-час электроэнергии, которая вырабатывается атомной генерирующей станцией. Таким образом, данные затраты ухудшают экономическую эффективность атомной генерации, особенно на первоначальном этапе, когда издержки на все стадии проектирования и строительства станции изначально высоки.

Неким компромиссом в данной ситуации может являться рассмотрение вопроса проектирования и строительства атомной электростанции в Казахстане на основе технологии малых модульных станций (далее – ММР).

При этом представляется, что подходы к реализации проектных решений для систем физической защиты (СФЗ) для ММР и традиционных крупных ядерных станций (например, с реакторами ВВЭР-1200) имеют значительные отличия, обусловленные различиями в конструкции, объеме ядерного материала, размещении и эксплуатационных характеристиках.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

По информации МАГАТЭ, в мире существует более 80 проектов и концепций генерирующих станций на основе технологии ММР [1]. Большинство из них находятся на разных стадиях разработки, а некоторые, как утверждается, готовы к развертыванию в ближайшее время. В настоящее время четыре ММР находятся на продвинутых стадиях строительства в Аргентине, Китае и России, а несколько существующих и новых стран с ядерной энергетикой проводят исследования и разработки ММР [2].

Некоторые компании-разработчики атомных электростанций на базе ММР утверждают, что из-за надежных пассивных систем безопасности ядерных реакторов, нет необходимости в создании высокозатратной системы физической защиты и развертывания сил быстрого реагирования в непосредственной близости к ядерной установке.

В частности, разработчик ММР NuScale (США), подчеркивает, что их дизайн включает пассивные системы безопасности, которые обеспечивают выключение и самоохладение реактора на неограниченное время без необходимости в действиях оператора, использования компьютера, электроэнергии или добавления воды, что минимизирует риски аварий и потребность в активном вмешательстве. Это косвенно влияет на требования, предъявляемые к системе физической безопасности, уменьшая потребность в ней [3].

Тот же разработчик технологии атомной станции на базе ММР отмечает, что патентованная конструкция «Triple Crown for Nuclear Plant Safety» имеет систему отключения и самоохладения без каких-либо действий оператора, без питания переменного или постоянного тока и без дополнительной воды, что является первым примером в практике использования технологического решения для коммерческой ядерной энергетики. Для реактора технологии NuScale

специально разработаны защитный корпус высокого давления, избыточный пассивный отвод остаточного тепла, а также системы отвода тепла от защитного кожуха. Использование этой конструкции и обеспечивает работу пассивных систем безопасности, снижает вероятность возникновения аварий и уменьшает необходимость в большом штате сил охраны и реагирования. Подземное размещение модулей и компактный дизайн (реактор в бассейне глубиной 10 м) дополнительно затрудняют несанкционированный доступ, потенциально снижая потребность в вооруженных силах на месте [4].

Другой разработчик электростанции на базе MMP, Holtec International (SMR-300, США) описывает перспективную технологию на базе MMP SMR-300 с полностью пассивными системами, использующими естественную циркуляцию без насосов. При этом, разработчик указывает на то, что такая конструкция повышает безопасность и снижает уязвимость к саботажу, поскольку полностью пассивный дизайн обеспечивает безопасность реактора без внешнего питания или действий оператора [5]. При этом Holtec подчеркивает, что отсутствие активных компонентов (насосов, клапанов) и компактный дизайн снижают риски аварий и упрощают защиту. Подземное размещение (например, в проекте на Palisades, Мичиган) усиливает физические барьеры, что может уменьшить потребность в постоянных силах охраны. В то же время, Holtec не заявляет напрямую об исключении необходимости развертывания систем ядерной физической безопасности и сил охраны, говоря скорее о возможности уменьшения затрат на безопасность [6].

Корейский разработчик АЭС на базе MMP SMART (100 МВт) использует интегральную компоновку, исключая крупные трубопроводы, и пассивные системы охлаждения, что снижает риск аварий типа LBLOCA (потеря теплоносителя). Как отмечает Lee, J.I. и другие в статье «Review of Small Modular Reactors: Challenges in Safety and Economy to Success», интегральная конструкция SMART исключает трубопроводы между основными компонентами, что делает систему компактной и исключает крупные аварии с потерей теплоносителя, значительно повышая безопасность [5].

Другой разработчик технологии станций на базе MMP, Rolls-Royce SMR (470 МВт) использует технологию легководных реакторов с пассивными и активными системами безопасности, а также железобетонной оболочкой (толщина 1,5 м) для защиты от внешних воздействий, включая ракетные удары. Предполагается, что MMP дизайна Rolls-Royce SMR будет включать в себя пассивные и активные системы безопасности, обеспечивая устойчивость к внешним угрозам, таким как авиакатастрофы, и минимизируя риски аварий [7]. Rolls-Royce подчеркивает, что дизайн реактора от этой компании снижает уязвимость благодаря стандартизированному подходу к проекти-

рованию и прочной оболочке. Пассивные системы (естественное охлаждение и другие) уменьшают зависимость от активных компонентов, что может сократить потребность в системах безопасности и минимизировать штат охраны. Однако прямых заявлений об исключении сил безопасности эта компания – разработчик не делает, подчеркивается, что оптимизация достигается путем интеграции безопасности в дизайн («security by design»).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В октябре 1979 года ООН принята Конвенция о физической защите ядерного материала и ядерных установок [8], ратифицированная Законом Республики Казахстан в 2011 году [9]. Согласно данным документам, требования к физической защите следует основывать на дифференцированном подходе, учитывая результаты текущей оценки угрозы, относительную привлекательность, характер материала и возможные последствия, связанные с несанкционированным изъятием ядерного материала и с саботажем против ядерного материала или ядерных установок. Это общепринятый принцип МАГАТЭ, заложенный как в нормативно-обязывающих документах (Конвенция о ФЗ, см. [8]), так и в многочисленных документах МАГАТЭ, который содержит рекомендации странам-участникам по организации систем физической защиты на ядерных установках (к примеру, данный тезис находит отражение в Рекомендациях по физической ядерной безопасности, касающиеся физической защиты ядерных материалов и ядерных установок (INFCIRC/225/REVISION 5), при этом в данном документе подробно раскрывается смысл и содержание данного тезиса) [10].

Действующее законодательство Республики Казахстан устанавливает перечень требований по физической защите ядерных материалов и ядерных установок. Так, согласно ст. 13 Закона РК «Об использовании атомной энергии», при осуществлении деятельности в области использования атомной энергии, эксплуатирующая организация должна обеспечивать ядерную физическую безопасность [11]. В целях обеспечения ядерной физической безопасности, осуществляется физическая защита объектов использования атомной энергии, которая должна обеспечивать защиту объекта использования атомной энергии от:

- несанкционированного изъятия,
- хищения ядерных материалов,
- незаконного захвата ядерной установки,
- диверсии,

а также смягчение или сведение к минимуму радиологических последствий возможной диверсии.

При этом нормой закона определено, что охрана ядерных установок 1 и 2 категорий радиационной опасности (к указанным категориям будет относиться планируемая атомная электростанция в РК) осуществляется специализированными охранными подразделениями органов внутренних дел.

Кроме того, в соответствии с подпунктом 6 статьи 6 Закона РК «Об использовании атомной энергии», в Казахстане приняты и действуют Правила физической защиты ядерных материалов и ядерных установок. Данные Правила детализируют требования указанного выше Закона и устанавливают порядок организации физической защиты ядерных материалов и ядерных установок в Республике Казахстан [12].

Таким образом, в Казахстане приняты и действуют нормативные регуляторные механизмы, обязывающие проектировать и эксплуатировать ядерные установки, к которым относятся и атомные электростанции на основе технологии ММР с эффективными системами ядерной физической безопасности (ЯФБ), которые обеспечивают глубокоэшелонированную защиту.

При рассмотрении подходов к проектированию систем ЯФБ любых ядерных установок в Казахстане, в частности, атомных станций на базе ММР, следует учитывать необходимость проведения оценки состояния ЯФБ [12]. Данный подход отвечает тенденциям и методам оценки эффективности ЯФБ, принятым МАГАТЭ. К примеру, документ МАГАТЭ «National Nuclear Security Threat Assessment, Design Basis Threats and Representative Threat Statements. Implementing Guide» рекомендует проводить регулируемому органу оценку эффективности проекта системы ядерной безопасности каждого оператора на основе представленного плана безопасности [13].

В литературе описано довольно много подходов к количественной и качественной оценке эффективности систем физической защиты. Имеются исследования по данному направлению различных авторов и авторских коллективов, представляющих, как правило, страны, имеющие хорошо развитую атомную отрасль [14–17] и др.

Одной из количественных оценок эффективности ЯФБ является методология EASI (Estimate of Adversary Sequence Interruption) [15, 16], в которой мера общей эффективности системы физической защиты выражается как вероятность P_E . P_E определяется с использованием двух переменных: вероятность обнаружения действий нарушителя (P_I) и вероятность нейтрализации нарушителя (P_N). Методы анализа эффективности ЯФБ основаны на изучении вектора атаки нарушителя системы и предположениях о том, что для успешного осуществления атаки на ядерную установку нарушителю потребуется определенная последовательность действий. Путь нарушителя может начинаться и заканчиваться за пределами объекта (внешняя угроза, цель кражи), он может начинаться снаружи и заканчиваться внутри объекта (внешний, саботаж) или он может начинаться внутри и заканчиваться внутри или снаружи (внутренний, саботаж или кража). Важно отметить, что P_E меняется в зависимости от угрозы и рассчитывается по формуле:

$$P_E = P_I \cdot P_N. \quad (1)$$

Как в документах МАГАТЭ, так и в других источниках отмечается, что приемлемым уровнем эффективной системы физической защиты является оценка, при которой вероятность $P_E \geq 0,9$.

Одним из самых критических показателей при оценке эффективности систем физической защиты ядерных установок является оценка времени задержки, то есть времени, в течение которого потенциальный нарушитель будет преодолевать физические барьеры для достижения цели на объекте.

Расчет времени задержки определяется по формуле:

$$T_d = \sum \frac{d_i}{V_i}, \quad (2)$$

где T_d – время задержки, d_i – характеристика физического барьера (к примеру, толщина забора, толщина железобетонной оболочки и т.д.), а V_i – скорость преодоления физического барьера.

Из формулы (2) можно видеть, что время задержки – интегральная величина и определяется суммой показателей времени задержки для всех барьеров, которые встречаются на пути нарушителя. В данном случае, чем больше таких барьеров и чем меньше скорость их преодоления, тем больше требуемая для сил охраны и реагирования величина – T_d .

Успешность достижения цели противником измеряется величиной, определенной как вероятность прерывания злонамеренных действий (P_i), см. рисунок 1. Данная переменная определяет вероятность того, что система безопасности вовремя обнаружит противника, чтобы отреагировать/прервать его до того, как он завершит свою задачу. Модель своевременного обнаружения фокусируется на показателе P_i как на показателе эффективности пути.

Такой подход применяется для определения эффективности систем физической защиты ядерной установки [18]. На рисунке 1 ниже показана диаграмма, описывающая путь нарушителя и реагирования сил охраны объекта на его действия. Линейка в верхней части диаграммы указывает на временные отрезки пути нарушителя, то есть на время выполнения задачи, которое требуется противнику для преодоления физических барьеров, а также возможности обнаружения силами реагирования вдоль пути, которые являются триггером для задействования сил реагирования. Ниже временной шкалы противника указаны временные отрезки, показывающие разницу между временем, когда силы реагирования готовы прервать действия нарушителя и временем выполнения задачи противника, оставшимся до успешного завершения атаки после первого обнаружения, при каждой следующей возможности обнаружения.

На диаграмме видно, что если время ответа меньше, чем время, которое требуется противнику для завершения атаки после первого обнаружения, то система СФЗ эффективна, силы реагирования успевают пресечь действия нарушителя. Если время

отклика СФЗ больше, чем время, которое требуется силам реагирования, чтобы пресечь действия нарушителя, то системы СФЗ не эффективна (самая нижняя часть диаграммы).

Для каждой точки обнаружения характерен свой показатель вероятности прерывания действий нарушителя (обычно обозначается P_i – Probability of Interruption). Чем раньше будет обнаружен противник, тем выше показатель P_i . Для примера на рисунке 1 первые две возможности обнаружения (точка 1 и 2 диаграммы) своевременны, поэтому $P_i = P$ (обнаружение при возможности обнаружения в точках 1 или 2). Точка 2 является критической точкой первого обнаружения, все точки, находящиеся правее по оси,

указывают на то, что нарушитель успешно завершит злонамеренное действие.

МАГАТЭ придерживается методологии оценки эффективности СФЗ, предлагая оценивать вероятность обнаружения нарушителя и прерывания его действий по пути следования к цели [19]. На рисунке 2 сверху показана временная шкала, указывающая на время, которое требуется противнику для выполнения всех задач злоумышленника по объекту, а также возможности обнаружения его действий средствами детектирования СФЗ на этой временной шкале. Каждая возможность обнаружения СФЗ имеет вероятность обнаружения, которую можно оценить на основе имеющихся расчетных данных, а также тестов на реальном объекте.

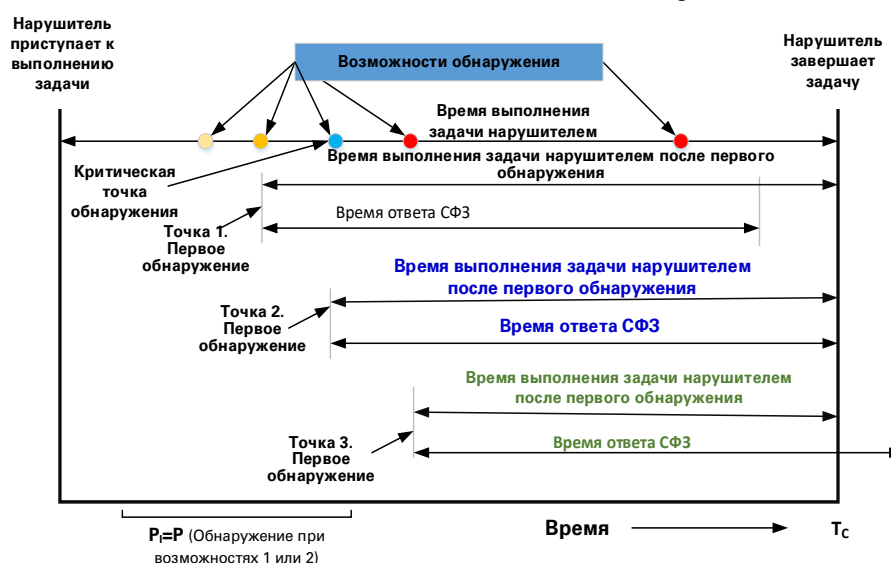


Рисунок 1. Соотношение времени, требуемого противнику и силам охраны для завершения атаки злоумышленником

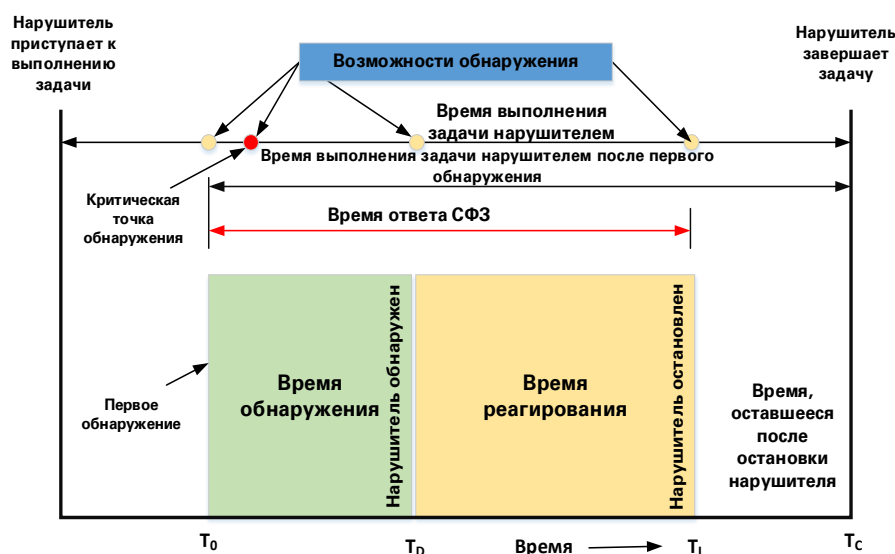


Рисунок 2. Сравнение времени действий противника и сил реагирования

Последняя возможность обнаружения, которая обеспечит обнаружение вовремя, чтобы позволить своевременно прервать противника, является критической точкой обнаружения. Под временной шкалой противника на рисунке 2 показано время отклика СФЗ и время до достижения целей противника, оставшееся на пути после первого обнаружения для каждого возможного обнаружения.

Следует отметить, что в случае с обеспечением безопасности ММР представляется необходимым учесть следующие конструктивные особенности этой технологии. Станции на базе ММР характеризуются компактностью модулей, что означает меньше потенциальных путей атаки нарушителем, в то же время увеличивается важность защиты каждого из них. Уменьшенное количество персонала, по сравнению с традиционной станцией, обуславливает значительно более высокий уровень автоматизации и возможностью удалённого управления критически важной информационной инфраструктурой станции, что потребует интеграции кибербезопасности в создаваемые модели ЯФБ. Модульная конструкция ММР позволяет собирать системы ЯФБ удаленно, на заводе-изготовителе данного оборудования, что – с одной стороны снижает риски на этапе строительства, в то же время данное обстоятельство вводит новые сценарии угроз на этапах транспортировки готовых модулей, содержащих ядерные материалы, и их монтажа. Также требует отдельного рассмотрения вопрос оценки ЯФБ таких станций при совместном размещении модулей, которые на традиционных объектах должны находиться в особо охраняемой зоне, а на объектах ММР размещаются в зонах с меньшими требованиями по обеспечению безопасности. Также высока важность изучения специфических систем ММР, к примеру, таких пассивных систем как естественная циркуляция в NuScale, которые снижают вероятность возникновения аварий, однако, требуют усиленного контроля доступа к активной зоне, герметизированной заводом-изготовителем.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Малые модульные реакторы представляют перспективное направление ядерной энергетики благодаря компактности, модульности и пассивным системам безопасности. В настоящей статье, в качестве примера, приведены перспективные решения дизайнов ММР американского NuScale, корейского SMART и британского Rolls-Royce. Однако, потенциальных разработчиков атомных электростанций на базе данной технологии в мире с каждым днем становится все больше. Страны, которые ранее не имели собственной мирной атомной программы, активно вовлекаются в этот процесс и, по оценкам МАГАТЭ, данный тренд будет только возрастать. Как отмечено в докладе МАГАТЭ на международной конференции по ММР и их применению 21–25 октября 2024 года, рынок ММР быстро развивается, подпитываемый технологическими инновациями, растущим спросом

на энергию и растущим вниманием к чистой и надежной энергии [20]. На этот рынок приходят новые конечные пользователи, такие как технологические компании, стремящиеся к чистой электроэнергии для питания своих центров обработки данных и приложений искусственного интеллекта, что оказывает большое позитивное влияние на будущее направление ММР. Понимание и управление затратами и рисками, обеспечение доступного финансирования, создание местной инфраструктуры, улучшение глобальных цепочек поставок и эффективное информирование о преимуществах ММР будут иметь важное значение для успешного развертывания и вклада ММР в достижение глобальных целей в области энергетики, климата и развития в ближайшие годы.

Однако, несмотря на модульность, компактность решений на базе ММР, нельзя обходить стороной вопросы обеспечения ядерной физической безопасности ядерных установок, проектируемых на основе данной технологии. При этом, наряду с существующими рисками, следует рассматривать весь технологический путь установки на базе ММР в силу модульного принципа ее построения и переноса значительного объема строительных работ на завод-изготовитель модуля и его последующую транспортировку к месту использования. При проектировании систем ядерной физической безопасности вполне применимы подходы, принятые МАГАТЭ, с учетом риск-ориентированного подхода построения глубокоэшелонированной защиты, с учетом особенностей технологии ММР. Также следует отметить, что планирование финансовых затрат на проектирование и создание СФЗ для станций на базе ММР следует осуществлять с учетом того, что эффективность СФЗ будет в состоянии покрывать все риски и обеспечивать уверенную равнопрочную защиту атомной станции в целом.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вывод из эксплуатации ядерных объектов. Бюллетень МАГАТЭ, 2023. <https://www.iaea.org/sites/default/files/23-01076bulletinmarchdecomissioning.pdf>
2. Small modular reactors: flexible and affordable power generation <https://www.iaea.org/topics/small-modular-reactors>.
3. Welter Kent, Reyes José N., Brigantic Adam, Unique safety features and licensing requirements of the NuScale small modular reactor // *Frontiers in Energy Research*. – 2023. – Vol. 11. – ISSN 2296-598X. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2023.1160150>
4. What Should I Do if a Small Modular Reactor Loses Off-Site Power? Office of Nuclear Energy September 2, 2020 <https://www.energy.gov/ne/articles/what-should-i-do-if-small-modular-reactor-loses-site-power>
5. Lee, J.I. Review of Small Modular Reactors: Challenges in Safety and Economy to Success // *Korean J. Chem. Eng.* – 2024. – Vol. 41. – P. 2761–2780. <https://doi.org/10.1007/s11814-024-00207-0>
6. Jennifer L. What is SMR? The Ultimate Guide to Small Modular Reactors February 18, 2025, Updated: March 3,

2025. <https://carboncredits.com/the-ultimate-guide-to-small-modular-reactors/>
7. Clean, affordable energy for all. Rolls-Royce SMR. <https://www.rolls-royce-smr.com/>
8. Конвенция о физической защите ядерного материала и ядерных установок. https://www.un.org/ru/documents/decl_conv/conventions/nucmat_protection.shtml#a1
9. О ратификации Поправки к Конвенции о физической защите ядерного материала Закон Республики Казахстан от 19 марта 2011 года № 416-IV. <https://adilet.zan.kz/rus/docs/Z1100000416>
10. Рекомендации по физической ядерной безопасности, касающиеся физической защиты ядерных материалов и ядерных установок (INFCIRC/225/REVISION 5), МААТЭ, Вена, 2012.
11. Об использовании атомной энергии Закон Республики Казахстан от 12 января 2016 года № 442-V ЗРК.
12. Правила физической защиты ядерных материалов и ядерных установок. Утверждены приказом Министра энергетики Республики Казахстан от 8 февраля 2016 года № 40.
13. National Nuclear Security Threat Assessment, Design Basis Threats and Representative Threat Statements Implementing Guide // IAEA Nuclear Security Series No. 10-G (Rev. 1).
14. Степанов Б.П. Основы проектирования систем физической защиты ядерных объектов: учебное пособие / Б.П. Степанов, А.В. Годовых // Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета. – 2009 – 118 с.
15. Garcia, Mary Lynn. Vulnerability assessment of physical protection systems / Sandia National Laboratories, 2006.
16. Garcia, Mary Lynn. The design and evaluation of physical protection systems // Elsevier Science (USA), 2001.
17. Оценка состояния системы физической защиты на радиационно-опасном объекте / Петровский Н.П., Телков С.Н., Пинчук Г.Н., Радченко В.Е., Смирнов В.В., Егоров А.А., Киртаев А.Е. (ФБУ «НТЦ ЯРБ»), Кузин В.В., Стещенко М.С., Иванов М.В., Ковалев К.В. (Ростехнадзор), Москва, 2016 г.
18. Sung Soon Jang. The path analysis algorithm for a 2D map configuration of Physical Protection System. Transactions of the Korean Nuclear Society Spring Meeting Jeju, Korea, May 18-19, 2017 Korea Institute of Nuclear Nonproliferation and Control. <https://www.kns.org/>
19. Handbook on the Design of Physical Protection Systems for Nuclear Material and Nuclear Facilities. IAEA, IAEA Nuclear Security Series No. 40-T, Vienna, 2021.
20. Small modular reactors. Advances in SMR Developments. International Conference on SMR and their Applications 21-25 October 2024. https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/p15790-PUB9062_web.pdf
2023. – Vol. 11. – ISSN 2296-598X. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2023.1160150>
4. What Should I Do if a Small Modular Reactor Loses Off-Site Power? Office of Nuclear Energy September 2, 2020. <https://www.energy.gov/ne/articles/what-should-i-do-if-small-modular-reactor-loses-site-power>
5. Lee, J.I. Review of Small Modular Reactors: Challenges in Safety and Economy to Success // Korean J. Chem. Eng. – 2024. – Vol. 41. – P. 2761–2780. <https://doi.org/10.1007/s11814-024-00207-0>
6. Jennifer L. What is SMR? The Ultimate Guide to Small Modular Reactors February 18, 2025, Updated: March 3, 2025. <https://carboncredits.com/the-ultimate-guide-to-small-modular-reactors/>
7. Clean, affordable energy for all. Rolls-Royce SMR. <https://www.rolls-royce-smr.com/>
8. Konventsiya o fizicheskoy zashchite yadernogo materiala i yadernykh ustanovok https://www.un.org/ru/documents/decl_conv/conventions/nucmat_protection.shtml#a1
9. O ratifikatsii Popravki k Konventsii o fizicheskoy zashchite yadernogo materiala Zakon Respubliki Kazakhstan ot 19 marta 2011 goda No. 416-IV. <https://adilet.zan.kz/rus/docs/Z1100000416>
10. Rekomendatsii po fizicheskoy yadernoy bezopasnosti, kasayushchiesya fizicheskoy zashchity yadernykh materialov i yadernykh ustanovok (INFCIRC/225/REVISION 5), MAATE, Vena, 2012.
11. Ob ispol'zovanii atomnoy energii Zakon Respubliki Kazakhstan ot 12 yanvarya 2016 goda No. 442-V ZRK.
12. Pravila fizicheskoy zashchity yadernykh materialov i yadernykh ustanovok. Utverzhdeny prikazom Ministra energetiki Respubliki Kazakhstan ot 8 fevralya 2016 goda No. 40.
13. National Nuclear Security Threat Assessment, Design Basis Threats and Representative Threat Statements Implementing Guide. IAEA Nuclear Security Series No. 10-G (Rev. 1).
14. Stepanov B.P. Osnovy proektirovaniya sistem fizicheskoy zashchity yadernykh ob'ektov: uchebnoe posobie / B.P. Stepanov, A.V. Godovykh // Tomskiy politekhnicheskii universitet. – Tomsk: Izd-vo Tomskogo politekhnicheskogo universiteta, 2009 – 118 p.
15. Garcia, Mary Lynn. Vulnerability assessment of physical protection systems // Sandia National Laboratories, 2006
16. Garcia, Mary Lynn. The design and evaluation of physical protection systems // Elsevier Science (USA), 2001
17. Otsenka sostoyaniya sistemy fizicheskoy zashchity na radiatsionno-opasnom ob'ekte / Petrovskiy N.P., Telkov S.N., Pinchuk G.N., Radchenko V.E., Smirnov V.V., Egorov A.A., Kirtaev A.E. (FBU «NTTs YaRB»), Kuizin V.V., Steshenko M.S., Ivanov M.V., Kovalev K.V. (Rostekhnadzor), Moscow, 2016 g.
18. Sung Soon Jang. The path analysis algorithm for a 2D map configuration of Physical Protection System. Transactions of the Korean Nuclear Society Spring Meeting Jeju, Korea, May 18-19, 2017 Korea Institute of Nuclear Nonproliferation and Control. <https://www.kns.org/>
19. Handbook on the Design of Physical Protection Systems for Nuclear Material and Nuclear Facilities // IAEA, IAEA Nuclear Security Series, Vienna – 2021. – No. 40-T.
20. Small modular reactors. Advances in SMR Developments. International Conference on SMR and their Applications 21-25 October 2024. https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/p15790-PUB9062_web.pdf

REFERENCES

**ШАҒЫН МОДУЛЬДІ РЕАКТОРЛАРҒА НЕГІЗДЕЛГЕН АТОМ ЭЛЕКТР СТАНЦИЯЛАРЫ ҮШІН
ЯДРОЛЫҚ ФИЗИКАЛЫҚ ҚАУІПСІЗДІКТІ ҚАМТАМАСЫЗ ЕТУДІҢ ЖӘНЕ ТИІМДІЛІГІН
БАҒАЛАУДЫҢ КЕЙБІР МӘСЕЛЕЛЕРІ**

А. В. Сысәлетин^{1*}, В. В. Бакланов², В. А. Поспелов²

¹ *«Қазақстан Республикасының Ұлттық ядролық орталығы» РМК, Курчатов, Қазақстан*

² *ҚР ҰЯО РМК «Атом энергиясы институты» филиалы, Курчатов, Қазақстан*

** Байланыс үшін E-mail: syssaletin@nnc.kz*

Мақалада шағын модульді реакторлар негізінде ядролық қондырғылардың ядролық физикалық қауіпсіздігін қамтамасыз ету тәсілдері, сондай-ақ физикалық қорғау жүйелерінің тиімділігін бағалау әдістемесі қарастырылған. Бұл тәсілдер МАГАТЭ қағидаттарына негізделеді, Қазақстан Республикасының заңнамасы және шағын модульді реакторлар негізіндегі ядролық қондырғылардың қауіпсіз жұмыс істеуін қамтамасыз ету жөніндегі халықаралық тәжірибе ескеріледі.

Түйін сөздер: ядролық физикалық қауіпсіздік, шағын модульді реакторлар, тиімділікті бағалау, физикалық қорғау, анықтау ықтималдығы, ядролық қондырғы.

**ABOUT SOME ISSUES OF ENSURING AND EFFECTIVENESS EVALUATION OF NUCLEAR SECURITY
FOR NUCLEAR POWER PLANTS BASED ON SMALL MODULAR REACTORS**

A. V. Syssaletin^{1*}, V. V. Baklanov², V. A. Pospelov²

¹ *RSE “National Nuclear Center of the Republic of Kazakhstan”, Kurchatov, Kazakhstan*

² *Branch “Institute of Atomic Energy” RSE NNC RK, Kurchatov, Kazakhstan*

** E-mail for contacts: syssaletin@nnc.kz*

The paper provides an examination of approaches to ensuring Nuclear Security of nuclear facilities based on small modular reactors, as well as a methodology for assessing the effectiveness of physical protection systems. These approaches are based on the principles of the IAEA, taking into account the legislation of the Republic of Kazakhstan and international experience in ensuring the safe and secure operation of nuclear facilities based on small modular reactors.

Keywords: nuclear security, small modular reactors, effectiveness evaluation, physical protection, probability of detection, nuclear facility.