

<https://doi.org/10.52676/1729-7885-2024-2-166-177>

УДК 621.039.5

АНАЛИЗ ПЕРСПЕКТИВ ВНЕДРЕНИЯ ГЕНЕРИРУЮЩИХ МОЩНОСТЕЙ НА БАЗЕ МАЛЫХ МОДУЛЬНЫХ РЕАКТОРОВ В РЕСПУБЛИКЕ КАЗАХСТАН

Д. Б. Зарва¹, В. А. Витюк¹, В. А. Поспелов², С. А. Мукенева^{1*}, М. Б. Шарипов¹, А. В. Гулькин¹

¹ *Национальный ядерный центр Республики Казахстан, Курчатов, Казахстан*

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

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

Гарантированное и надежное удовлетворение внутренних потребностей в необходимом объеме энергии в долгосрочный период является крайне важной задачей для любого государства. Для современных условий Казахстана эта задача приобретает особую значимость и актуальность, так как основные источники генерации энергии в стране базируются на угольных тепловых энергетических станциях, доля которых в структуре генерации в настоящее время составляет свыше 70%. Имеющиеся тепловые энергетические станции имеют высокую степень изношенности и оказывают негативное влияние на экологическую ситуацию в целом.

Развитие атомной энергетики в Республике Казахстан рассматривается как долгосрочный источник производства экологически чистой энергии, который позволит решить вопросы диверсификации энергетического сектора, обеспечить энергетическую безопасность и независимость страны на длительный период времени, а также обеспечить достижение углеродной нейтральности в максимально сжатые сроки.

Одним из основополагающих направлений развития современной атомной энергетики в мире является продвижение технологий малых модульных реакторов (ММР). Настоящая работа посвящена обзору и анализу имеющихся на сегодняшний день проектов ММР, а также предварительному анализу условий, перспектив и критериев для их внедрения в Республике Казахстан.

Ключевые слова: атомная энергетика, АЭС, ММР, углеродная нейтральность, атомные энергетические технологии.

ВВЕДЕНИЕ

Единая электроэнергетическая система Республики Казахстан (ЕЭС РК) представляет собой совокупность электрических станций, линий электропередач и подстанций, обеспечивающих энергоснабжение потребителей страны. ЕЭС Казахстана условно состоит из трех зон: Северной, Южной и Западной, при этом она обладает рядом ключевых особенностей:

- Размещение крупных генерирующих источников, вблизи топливно-энергетических ресурсов – угля в северном, газа в западном, водных ресурсов в юго-восточных регионах;

- Высокая концентрация генерирующих мощностей (свыше 7000 МВт в Павлодарской области) и удаленными от генерации центрами электрических нагрузок потребителей;

- Протяженные линии электропередач напряжением 220–500 кВ с пропускной способностью электрических сетей, определяемой устойчивостью параллельной работы энергоузлов.

Структура электропотребления в Республике Казахстан имеет характерные особенности. Доминирующие позиции занимает промышленность, доля которой составляет 56–57% от суммарного электропотребления. Коммунально-бытовое потребление составляет относительно низкую долю – 20–23%.

Структура электропотребления РК по зонам в целом всегда имела существенные различия. Доля промышленности по Северному и Западному Казахстану, как правило, составляла более 60% при доле ком-

мунально-бытового потребления, не превышающей 20%. В Южном Казахстане доля промышленности, как правило, ниже 40%, при более высокой доле коммунально-бытового потребления ≈35% [1].

Данные особенности структуры энергопотребления РК позволяют сделать вывод о том, что в структуре генерации должны преобладать источники, имеющие возможность генерировать энергию в базовом (постоянном) режиме, вместе с этим, обязательства РК по достижению углеродной нейтральности к 2060 году диктуют необходимость постепенного ухода от «классической» генерации на основе углеводородного топлива к перспективным безуглеродным источникам энергии.

Удаленность крупных источников генерации от центров электрических нагрузок потребителей, а также конечная пропускная способность линий электропередач приводит к необходимости децентрализации источников генерации. Учитывая значительную долю возводимых ВИЭ, а также долю коммунально-бытовых потребителей как представителей переменной нагрузки, к альтернативным источникам генерации с другой стороны предъявляются также определенные контртребования по обеспечению маневренности, т.е. возможности обеспечения режима следования за нагрузкой.

Возможностью обеспечения децентрализации генерации в определенном масштабе, а также обеспечения как базового, так и маневренного режима работы в совокупности обладают перспективные АЭС и

АТЭЦ на базе ММР. Выгодное отличие таких источников генерации от имеющих сходные характеристики в плане обеспечения режимов работы газовых энергетических станций состоит в независимости района их размещения от наличия топлива, а также низкая зависимость стоимости их генерации от изменения цен на топливо, что делает ММР привлекательными с точки зрения внедрения их в структуру генерации страны, в том числе в качестве замещения выбывающих из эксплуатации тепловых электрических станций, особенно в районах со слаборазвитой сетевой инфраструктурой.

ОЦЕНКА ПРЕИМУЩЕСТВ И АНАЛИЗ ПЕРСПЕКТИВ ВНЕДРЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ИСТОЧНИКОВ НА БАЗЕ ММР В РК

В настоящее время в Республике Казахстан имеются все необходимые предпосылки для развития собственной атомной энергетической программы и строительства АЭС, включая развитую урановую промышленность (наличие урановых рудников, завода по производству компонентов ядерного топлива), развитую научно-техническую базу (наличие 3 действующих исследовательских реакторов, а также других установок), квалифицированные кадры и т.д.

В целом можно выделить следующие основные преимущества развития атомной энергетики в РК:

- Диверсификация генерирующих мощностей и создание долгосрочных источников энергии (60–80 лет) с целью обеспечения энергетической безопасности страны;
- Оптимизация использования углеводородного сырья (развитие нефтехимии и экспорта) и урановых ресурсов (создание производства ядерного топлива);
- Повышение технологического уровня и создание высокотехнологичных отраслей экономики РК, развитие научно-технического потенциала страны;
- Улучшение экологической ситуации за счет использования АЭС, не имеющих выброс углекислого газа и продуктов горения.

Вместе с этим, строительство АЭС большой мощности требует учета ряда следующих, довольно чувствительных факторов:

- Высокая капиталоемкость проекта по созданию АЭС, относительно длительный срок до запуска первого энергоблока;
- Необходимость решения вопросов обращения с радиоактивными отходами и отработавшим ядерным топливом;
- Неоднозначное отношение общественности к вопросам строительства АЭС в РК (радиофобия).

Ожидается, что АЭС и АТЭЦ на базе ММР в целом будут в несколько меньшей степени подвержены вышеуказанным проблемам атомной энергетики в целом, в силу их сравнительно невысокой установленной мощности, снижения сроков и капитальных затрат на их внедрение за счет расширения границ заводского цикла производства реакторных установок и основного технологического оборудования. Тем не

менее, первые внедряемые ММР скорее всего будут обладать относительно низкой удельной экономической эффективностью, по причине необходимости покрытия сравнительно высоких затрат на их разработку и внедрение.

По классификации МАГАТЭ малые модульные реакторы – это современные ядерные реакторы мощностью до 300 МВт (эл.) на энергоблок, что составляет примерно одну треть от генерирующей мощности традиционных ядерных энергетических реакторов [2].

На сегодняшний день в мире в разработке находится около 70 концепций малых модульных реакторов [3], два ММР находятся на продвинутом этапе строительства (ACP100, CAREM25) и два на стадии эксплуатации (КЛТ-40С, HTR-PM), на стадии лицензирования и принятия решения о строительстве еще более двенадцати ММР.

Большое разнообразие конструкций ММР, разрабатываемых в настоящее время в странах-членах АЯЭ, подразумевает не только возможности, но и потенциальные проблемы. Несмотря на очевидное существование консенсуса, согласно которому только некоторые из имеющегося длинного перечня технологий будут в конечном счете внедрены в промышленном масштабе, позиции расходятся в отношении того, когда, каким образом и кем должны приниматься решения о выборе технологий, подлежащих развитию в будущем или запуску в серийное производство [4].

ПРОЕКТЫ ММР

На основе проведенного анализа представленных на сегодняшний день проектов ММР в мире, а также ряда специфических критериев, определенных авторами данной работы, был составлен перечень ММР для изучения перспективы их внедрения в РК.

КЛТ-40С (Россия)

Реактор КЛТ-40С [5, 7, 9, 10] разработан для плавучей атомной электростанции (ПАТЭС – FNPP) для обеспечения мощности 35 МВт (эл.) на модуль. Конструкция основана на судовой двигательной установке третьего поколения КЛТ-40 и представляет собой усовершенствованную версию реактора, обеспечивающую длительную эксплуатацию атомных ледоколов в более жестких условиях по сравнению со стационарной атомной электростанцией (АЭС). АЭС с реактором КЛТ-40С может быть изготовлена на верфях и доставлена на объекты полностью собранной, протестированной и готовой к эксплуатации. Нет необходимости развивать транспортные связи, линии электропередачи или подготовительную инфраструктуру, необходимую для наземных АЭС, и существует высокая степень свободы в выборе места для АЭС, поскольку она может быть пришвартована в любом прибрежном регионе.

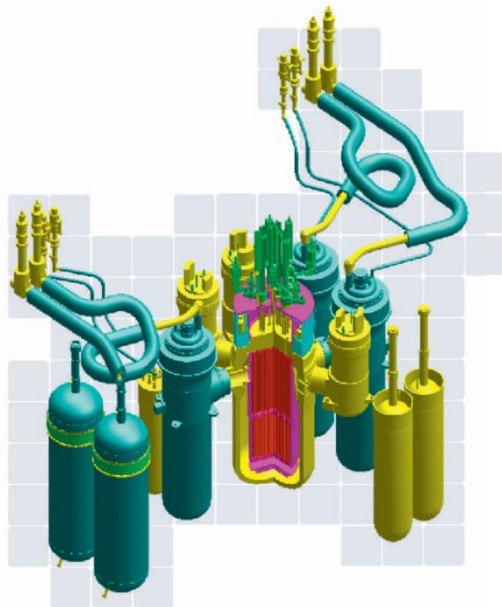


Рисунок 1. КЛТ-40С

Реактор КЛТ-40С относится к типу корпусных реакторов с водой под давлением, он аналогичен более крупным реакторам ВВЭР. Тепловая мощность реактора составляет 150 МВт. Реакторная установка ПАТЭС ММ по проекту должна выдавать около 40 МВт электрической мощности и 146 Гкал/час тепловой энергии. Работает реактор на урановом топливе с довольно высоким для гражданской энергетики обогащением – до 18,5%. Прототип КЛТ-40 работал на топливе, обогащенном до 40%.

NuScale (США)

NuScale Power Module (NPM) [5, 6, 7, 16] представляет собой небольшой реактор под давлением с водяным охлаждением (PWR). Установка NuScale масштабируема и может быть построена для размещения различного количества модулей в соответствии с потребностями заказчика в энергии. NPM мощностью 77 МВт (эл) обеспечивает мощность с шагом, который может быть увеличен до 925 МВт (эл) брутто в одной установке с двенадцатью модулями. Конфигурация из двенадцати модулей является эталонным размером установки для проектирования и лицензирования. Каждый NPM представляет собой автономный модуль, который работает независимо от других модулей в многомодульной конфигурации. Управление всеми модулями осуществляется из единой диспетчерской. Важные конструктивные особенности установки включают компактный модуль заводского изготовления, поток теплоносителя с естественной циркуляцией для всех режимов эксплуатации, защитную оболочку высокого расчетного давления, использование устоявшейся технологии легководных реакторов и разработку проекта на основе испытаний.

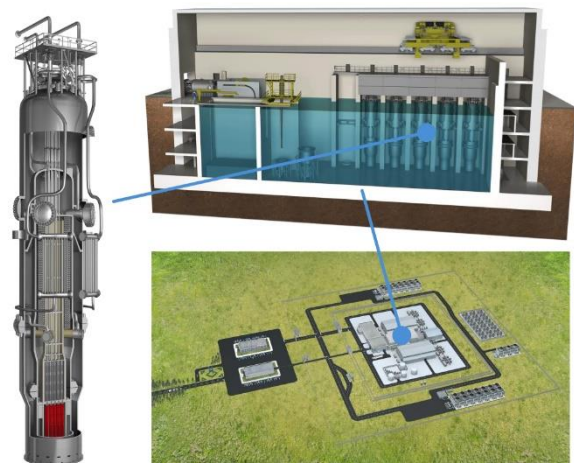


Рисунок 2. Установка NPM

Реактор высотой 20 м и диаметром 2,7 м находится внутри контейнента высотой 21,6 м и диаметром 4,5 м. В корпусе реактора расположена активная зона, состоящая из 37 топливных сборок (топливо: UO_2 , до 4,95%) и кластеров управляющих стержней. Реактор и контейнмент размещены внутри заполненного водой бассейна, который находится ниже уровня земли. Реактор работает с использованием принципов естественной циркуляции. КИУМ установки составляет более 95%. Транспортировка модуля весом около 700 т в общей сложности может осуществляться с завода в трех сегментах с использованием автомобильного, железнодорожного или морского транспорта. Отработавшее топливо хранится в бетонном бассейне, облицованном нержавеющей сталью, рядом с реакторным бассейном. Его расположение ниже уровня земли значительно снижает вероятность потери охлаждающей воды. Бассейн отработавшего топлива NuScale обеспечивает хранение ОЯТ до 10 лет, а также временное хранение новых топливныхборок. Объем воды в бассейне обеспечивает примерно 150 дней пассивного охлаждения отработавших топливныхборок после потери всей электроэнергии без необходимости в дополнительной воде. График строительства составляет 28,5 месяцев от первого бетона до пуска.

На сегодняшний момент планируется реализация проекта Carbon Free Power Project (CFPP) – первого проекта АЭС с ММР типа NuScale, которая будет построена на площадке Национальной лаборатории Айдахо Министерства энергетики США вблизи города Айдахо-Фолс и будет использовать шесть модулей NuScale мощностью 77 МВт каждый для выработки 462 МВт электроэнергии. Начало эксплуатации малой АЭС запланировано на 2029 год, а энергетическая компания Utah Associated Municipal Power Systems работает над тем, чтобы подать заявку на получение лицензии на строительство и эксплуатацию в Комиссию по ядерному регулированию США в январе 2024 года.

BWRX-300 (США)

BWRX-300 [3, 6, 7] – это кипящий водяной реактор нового поколения мощностью 300 МВт. Высочайшая безопасность реактора обеспечивается возможностью охлаждать остаточное тепло топлива большим объемом воды над реактором, без использования электроэнергии и вмешательства человека. Латинская буква X в названии модели указывает на то, что это десятое поколение кипящих водяных реакторов GE Hitachi. Главным достоинством технологии является ускоренный процесс строительства с использованием стальных строительных модулей вместо залитого бетона.

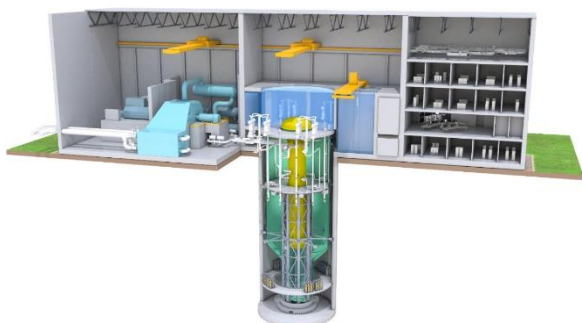


Рисунок 3. BWRX-300

Реактор представляет собой упрощенную версию кипящего реактора ESBWR. На новый проект реактора распространяются все лицензии, полученные на проект ESBWR (Комиссия США по ядерному регулированию выдала лицензию на проектирование ESBWR в 2014 году). Строительство реактора BWRX-300 потребует примерно на 50% меньше металла и бетона, чем строительство ESBWR. В проектировании нового реактора были также использованы наработки, полученные в ходе работы над созданием проекта кипящего реактора ABWR в Великобритании. В проекте BWRX-300 предусмотрены естественная циркуляция теплоносителя, небольшой сухой подземный контейнмент, пассивные системы управления.

На данный момент проект модульного реактора BWRX-300 выбран для строительства в Канаде, Эстонии, США, Швеции и Скандинавии. Польша, и другие европейские страны также рассматривают данный вариант ММР как один из наиболее перспективных к строительству.

ACP-100 (Китай)

Проект ACP-100 [3, 11] – это интегральный легководный реактор под давлением. Его назначение – комбинированное производство тепла, электроэнергии и пресной воды. Тепловая мощность реактора (одного модуля) составляет 310 МВт, электрическая – 100 МВт. Количество модулей на площадке варьируется от двух до шести. Максимальная проектная производительность одного модуля по теплу составляет 1000 ГДж/ч. Максимальная проектная произво-

дительность модуля по пару – 420 т/ч. В проект включены пассивная система охлаждения активной зоны и пассивная система отвода остаточного энерговыделения. Перегрузка производится раз в два года, проектный срок службы – 60 лет. Сроки строительства – менее трёх лет. Давление в первом контуре – 15 МПа. Циркуляцию в первом контуре обеспечивают четыре насоса. В проекте используется 18 парогенераторов OTSG (Once-Through Steam Generators).

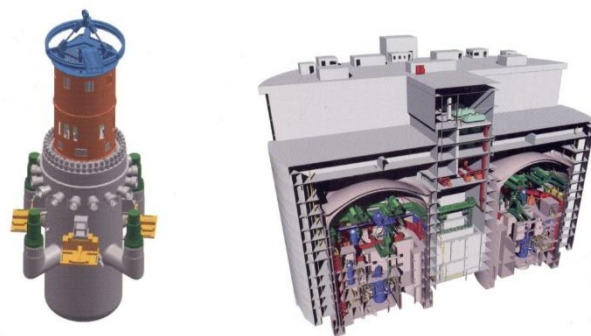


Рисунок 4. ACP-100

13 июля 2021 года официально началось строительство демонстрационного проекта малого модульного реактора (SMR) ACP100 на АЭС «Чанцзян» на китайском острове Хайнань. Китайская национальная ядерная корпорация (CNNC) заявила, что проект станет первой в мире наземной коммерческой малой АЭС. Многоцелевой реактор с водой под давлением – предназначен для производства электроэнергии, отопления, производства промышленного пара и опреснения морской воды. Окончание строительства планируется в 2026 году.

CAREM-25 (Аргентина)

CAREM-25 [3, 12, 14] представляет собой интегральный тип PWR, установленной мощностью 32 МВт (эл), или 100 МВт (тепл.). Авторы концепции CAREM относят его к четвёртому поколению реакторов. Проект разработан в качестве источника энергии для электроснабжения регионов с малым потреблением. Также может быть использован для работы опреснительной установки.

Блок CAREM состоит из трех модулей. Первый, самый большой, – это реактор в защитной оболочке с водяной рубашкой, бассейны отработавшего топлива и оборудование для аварийного охлаждения. Вторым модулем с неядерным оборудованием содержит турбогенератор, конденсатор и систему очистки воды. Третий модуль – центр управления. Электрическая мощность CAREM предполагалась более высокой, до 100–150 МВт при естественной циркуляции охладителя в первом контуре. Но спроектированным параллельно реакторам CAREM мощностью до 150 МВт естественной циркуляции для охлаждения уже будет недостаточно и они потребуют использования насосов.

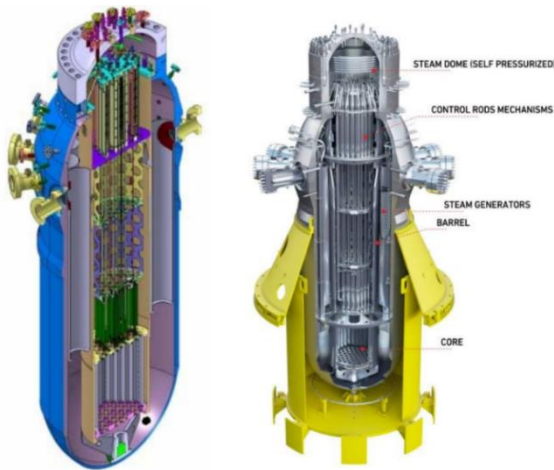


Рисунок 5. CAREM-25

Корпус реактора CAREM диаметром 3,2 метра и высотой 11 метров. В нем располагаются 12 вертикальных парогенераторов, производящих перегретый пар. CAREM работает на стандартном для водородных реакторов топливе с обогащением 3,1% или 3,4%, с выгорающим поглотителем из оксида гадолиния Gd_2O_3 . Активная зона CAREM-25 набирается из 61 шестигранной топливной кассеты. В топливной кассете 108 твэлов и твэгов, 18 стержней системы управления и защиты из поглощающего сплава серебра, индия и кадмия и один инструментальный канал. Топливная кампания – 510 эфф. суток при пятидесятипроцентной перегрузке активной зоны. Контейнер CAREM-25 выполнен из напряженного бетона и облицован нержавеющей сталью. В CAREM-25 имеются пассивная (основная) и активные (резервные) системы безопасности. В случае тяжелой аварии, даже при бездействии операторов и в отсутствие внешнего электропитания, активная зона «продержится» без повреждений 36 часов. Все это время остаточное энерговыделение отводится по принципу изолирующего конденсатора. Активная зона, гидравлические приводы органов регулирования, и двенадцать прямотрубных вертикальных парогенераторов (с перегревом пара) расположены в одном корпусе. В первом контуре – естественная циркуляция.

На данный момент возобновлены работы по строительству, подписан контракт на завершение основных бетонных работ реактора малой мощности CAREM-25.

SMART (Южная Корея)

Название реактора расшифровывается как System-integrated Modular Advanced Reactor. Это корпусной легководный реактор тепловой мощностью 330 МВт [3, 15]. В режиме выработки электроэнергии станция с таким реактором имеет мощность 90 МВт. В режиме работы как опреснительной станции, блок с реактором SMART будет выдавать до 40 тысяч тонн питьевой воды ежедневно. Ещё одно возможное применение SMART – отопление ближайших районов.

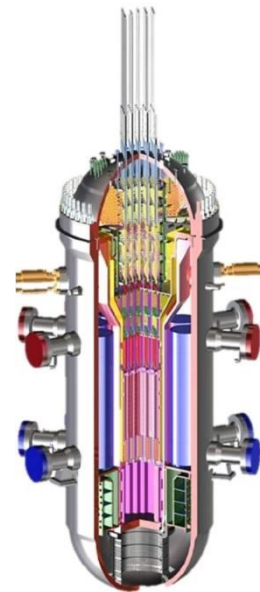


Рисунок 6. SMART

В проекте SMART сочетаются как проверенные технологии, как и инновационные решения. К первым относятся, например, использование стандартной квадратной топливной кассеты 17×17 с топливом из диоксида урана, наличие большого сухого контейнмента, конструкция приводов СУЗ, управление реактивностью с использованием стержней и борной кислоты. Среди инновационных решений выделяют интегральную компоновку – все основные компоненты первого контура находятся внутри корпуса реактора. АСММ SMART активно использует модульный принцип, что облегчает её строительство. Системы управления станцией полностью цифровые.

В 2020 году Министерство науки и информационных технологий Южной Кореи (MSIT) подписало соглашение с основным центром инновационных энергетических проектов Саудовской Аравии – Парком атомной и возобновляемой энергии имени короля Абдуллы (KACARE). Предметом соглашения является создание совместного предприятия по строительству в Саудовской Аравии реактора малой мощности по южнокорейскому проекту.

РИТМ-200Н (Россия)

Прототипом РИТМ-200Н [3, 6, 7, 8, 9] является реакторная установка РИТМ-200 для универсальных атомных ледоколов нового поколения, разработанная специалистами ОКБМ. В новом проекте применены решения, базирующиеся на уникальном опыте создания и эволюционном совершенствовании реакторных установок малой мощности. РУ РИТМ-200Н обладает высокими технико-экономическими показателями, которые отвечают современным требованиям безопасности и экологии. Номинальная электрическая мощность реактора РИТМ-200Н – 55 МВт, тепловая – 190 МВт, срок службы – 60 лет с возможностью продления.



Рисунок 7. РИТМ-200Н

Реактор выполнен по интегральной схеме, что обеспечивает объединение основного оборудования первого контура в едином корпусе и сокращение массогабаритных характеристик. Герметичный первый контур обеспечивает высокую безопасность и уменьшение радиационного воздействия на персонал, а в совокупности с отсутствием борного регулирования значительно сокращает образование радиоактивных отходов (РАО): объем жидких РАО за кампанию (5–6 лет) не превышает 20 т.

Топливная кампания активной зоны реактора РИТМ-200Н, составляющая 5-6 лет, значительно сокращает число ядерно-опасных работ по перегрузке ядерного топлива и образования отработавшего ядерного топлива (ОЯТ), которое выдерживается в пристанционном бассейне четыре года и затем вывозится в контейнеры для дальнейшего с ним обращения.

К 2028 году в Якутии «Росатом» вместе с местными властями планируют построить атомную станцию малой мощности на основе РИТМ-200Н.

UK SMR (Великобритания)

Проект UK SMR [3, 6, 7] относится к проектам реакторов средней мощности, его электрическая мощность составляет 443 МВт(э) при тепловой мощности 1276 МВт(т). Реактор UK SMR представляет собой легководный реактор под давлением. Реакторная установка трёхпетлевая, двухконтурная, насосы первого контура центробежного типа.

Обогащение урана находится в пределах, доступных для коммерческих легководных реакторов – до 4,95%. Кампания реактора – от 18 до 24 месяцев. Максимальная глубина выгорания – 55–60 ГВт·сут/т.

Системы безопасности предполагаются как активные, так и пассивные. Проектный срок службы реактора – 60 лет. Парогенератор вертикальный, с U-образными трубками. Среди отличительных черт проекта называются компактная площадка, (блок-) модульный подход к строительству, а также «аскетичные и функциональные внешние системы, устойчивые к опасностям».

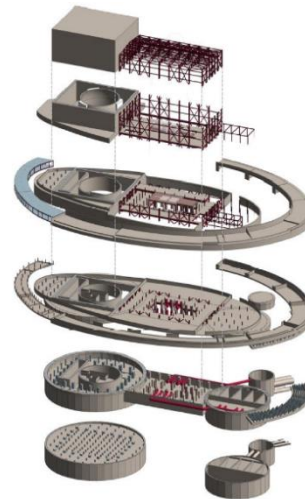


Рисунок 8. UK SMR

В проекте UK SMR предусмотрены максимально возможные стандартизация и серийность (повторяемость). Срок изготовления блок-модулей для одного блока – 500 дней, причём модульный подход минимизирует сроки строительства на площадке.

Транспортировка блок-модулей возможна любыми путями – автодороги, железные дороги, водные пути. В частности, из-за этого условия диаметр корпуса реактора UK SMR был ограничен 4,5 метрами, чтобы иметь возможность перевозить его по британским железным дорогам.

В 2020 году британская компания Rolls-Royce подписала меморандум о взаимопонимании (MOU) с американской компанией Exelon Generation с целью раскрытия потенциала Exelon для эксплуатации малых АЭС как в Великобритании, так и за рубежом. Exelon Generation будет использовать свой опыт эксплуатации, чтобы помочь Rolls Royce в разработке и развертывании программы малых модульных АЭС (SMR) в Великобритании.

ВБЭР-300 (Россия)

ВБЭР-300 [3, 6, 8, 9] относится к наиболее освоенному в мировой практике классу корпусного водоводяного реактора. Проектная концепция ВБЭР-300 основана на сочетании технологий и опыта создания и эксплуатации судовых ядерно-энергетических установок с решениями по активной зоне и топливному циклу АЭС с реакторами ВВЭР.

Тепловая мощность – 917 МВт. Реактор обеспечивает электрическую мощность энергоблока в конденсационном режиме до 325 МВт(э), в теплофикационном – около 215 МВт(э) с отпуском тепла в виде горячей воды до 460 Гкал/ч. Проектный срок службы – до 60 лет.

Блочное исполнение реактора отличается от реакторных установок, действующих АЭС отсутствием трубопроводов большого диаметра главного циркуляционного контура и, соответственно, аварий класса больших и средних течей. При этом все корпуса

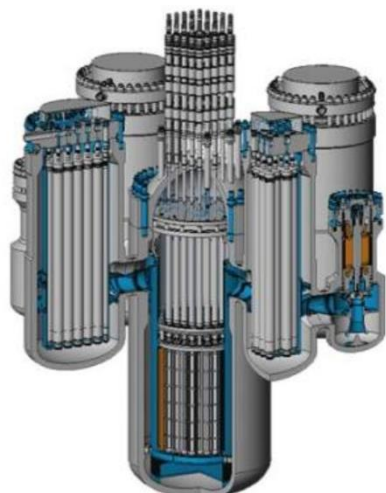


Рисунок 9. ВВЭР-300

основного оборудования установки – реактора, парогенераторов, главных циркуляционных насосов – свариваются между собой, образуя единый интегрированный корпус реакторного блока. Циркуляция теплоносителя первого контура по соединительным патрубкам основного тракта осуществляется по схеме «труба в трубе». За счет этого реакторный блок обладает повышенной прочностью и работоспособностью в условиях совместного воздействия эксплуатационных и сейсмических нагрузок.

Реакторная установка размещается в двойной герметичной защитной оболочке. Внутренняя металлическая оболочка диаметром 30 м обеспечивает герметичность внутреннего объема при всех режимах работы АЭС и проектируется на аварийное давление 0,5 МПа. Наружная оболочка – из монолитного железобетона, без системы предварительного натяжения арматуры – состоит из цилиндрической части и полусферического купола с толщиной 1,5 м. Ее строительные конструкции рассчитаны на внешние аварийные воздействия, в том числе падение самолета массой 20 т и воздушную ударную волну.

По уровню безопасности энергоблок с реактором ВВЭР-300 соответствует требованиям к перспективным атомным станциям поколения 3+, санитарно-защитная зона совпадает с периметром промплощадки. Это позволяет размещать его вблизи крупных городов, что имеет очень важное значение, поскольку практически все региональные энергоисточники задействованы для обеспечения тепла.

Проект ВВЭР-300 в прошлом рассматривался в качестве перспективного для строительства в Казахстане, в районе г. Актау.

HTR-PM (Kumay)

HTR-PM [3, 13] представляет собой высокотемпературный газоохлаждаемый реактор (HTGR) и основан на прототипе реактора HTR-10. HTR-PM состоит из двух малых 250-мегаваттных реакторов, которые приводят в движение одну паровую турбину мощностью 210 МВт.

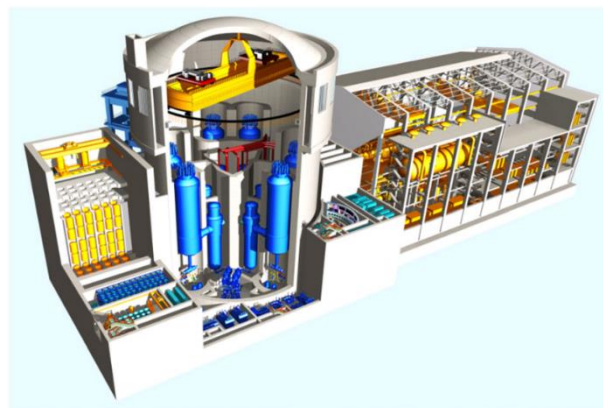


Рисунок 10. HTR-PM

В качестве теплоносителя используется гелий, а замедлителя – графит. В активную зону каждого реактора загружено более чем 245 000 сферических топливных элементов («камешков») диаметром 60 мм, содержащих по 7 г топлива, обогащенного до 8,5%. Каждый камешек-микротвэл имеет внешний слой графита и содержит около 12000 четырехслойных топливных частиц с керамическим покрытием, диспергированных в матрице из графитового порошка. Топливо обладает высокими характеристиками безопасности, и было доказано, что оно остается неповрежденным и продолжает сохранять радиоактивное содержимое при температурах до 1620 °С, что намного выше, чем температуры, которые могут возникнуть даже в экстремальных аварийных ситуациях, согласно данным Китайской ассоциации ядерной энергетики.

Работа над первой демонстрационной электростанцией началась в декабре 2012 года на АЭС Шидао Бэй в провинции Шаньдун. 9 декабря 2022 года проект HTR-PM достиг «первоначальной полной мощности».

ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ РАССМАТРИВАЕМЫХ ПРОЕКТОВ ММР

При проведении предварительного анализа рассматриваемых проектов ММР учитывались их следующие основные технико-экономические и технологические параметры [5–17]: наличие опыта международного строительства у разработчика технологии (страны происхождения), тип реактора, статус проекта на сегодняшний день (в стадии эксплуатации, сооружения, лицензирования, проектирования и т.д.), тип теплоносителя/замедлителя, тепловая мощность реактора, установленная электрическая мощность, способ охлаждения, давление теплоносителя (первый /второй контур), температура теплоносителя (на входе/выходе), тип топлива, обогащение топлива по U-235, количество ТВС в АЗ, среднее выгорание топлива, длительность топливной компании, способ регулирования мощности и воздействия на реактивность, наличие и тип систем безопасности, проектный срок службы станции, площадь площадки за-

стройки, габаритные размеры и масса корпуса реактора, сейсмостойкость, допустимый диапазон изменения мощности и маневренность, подход к конечной стадии ЯТЦ, отличительные особенности, вероятность тяжелой аварии с повреждением АЗ, вероятность большого выброса РВ, сроки строительства, удельные капитальные вложения в пересчете на 1 кВт (эл), LCOE и др.

С целью оценки перспектив внедрения рассматриваемых проектов ММР в Республике Казахстан было проведено их предварительное ранжирование по следующим основополагающим критериям:

1. *Технология*: водо-водяной реактор на тепловых нейтронах (наиболее распространенная и отработанная технология).

2. *Исполнение*: наземное (исходя из специфики применимости реактора на территории Казахстана).

3. *Мощность*: 50–300 МВт (в рамках диапазона мощности ММР, но не менее 50 МВт для возможности использования в составе промышленных комплексов).

4. *Проработанность проекта*: стадия завершения процесса лицензирования, стадия строительства, эксплуатации (предпочтение референтной технологии, имеющей действующий прототип, или наиболее близкой к этому).

5. *Срок службы*: не менее 60 лет.

6. *Топливная кампания*: более 24 месяцев (периодичность перегрузок в среднем большая, чем для реакторов большой мощности).

7. *Обогащение топлива активной зоны*: не более 20% (в соответствии с требованиями по нераспространению).

8. *Безопасность*: сейсмостойкость (более 0,2 g), наличие пассивных элементов защиты, возможность естественной циркуляции теплоносителя.

Финансово-экономические параметры на данном этапе подробно не рассматривались, т.к. достоверных сведений, с учетом текущего статуса проработки

большинства проектов ММР, по данному вопросу не имеется. Критерии № 1, 2 и 3 приняты исключительными.

По итогам предварительного ранжирования, представленного в таблице, с учетом применения исключительных критериев, необходимо констатировать следующее:

– Принятие решения о внедрении АЭС и АТЭС на базе ММР в РК целесообразно только после появления положительного опыта эксплуатации рассматриваемых типов энергоблоков.

– На данном этапе для рассмотрения возможности внедрения в РК могут быть рекомендованы реакторы: АСР100, SMART, BWRX-300, NuScale, ВБЭР-300 и РИТМ-200Н.

– В случае появления спроса на реакторы с возможностью генерации высокопотенциального тепла для решения соответствующих прикладных задач в настоящее время можно рекомендовать к рассмотрению реактор HTR-PM.

– При появлении положительного опыта строительства и эксплуатации, а также подтверждения удовлетворяющих условиям РК экономических характеристик, для обеспечения производства энергии в среднем мощностном диапазоне (300–600 МВт) к рассмотрению может быть рекомендован реактор UK SMR.

При проведении последующих исследований с целью рассмотрения возможности внедрения конкретных типов энергоблоков необходимо придерживаться принципа унификации. Предпочтительным является выбор варианта серийного строительства однотипных блоков (один поставщик технологий, тип реактора). В этом случае достигается эффект снижения величины капитальных затрат (за счет увеличения эффективности проведения строительно-монтажных работ) и эффект снижения стоимости производства электроэнергии на каждом последующем блоке.

Таблица. Предварительное ранжирование проектов ММР

Критерий	КЛТ-40С	АСР100	CAREM25	HTR-PM	SMART	РИТМ-200Н	BWRX-300	NuScale	UK SMR	ВБЭР-300
Технология	+	+	+	искл.	+	+	+	+	+	+
Исполнение	искл.	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Мощность	искл.	+	искл.	+	+	+	+	+	искл.	+
Проработанность проекта	+	+	+	+	+	+	+	+	–	+
Срок службы	–	+	–	–	+	+	+	+	+	+
Кампания	+	–	–	–	+	+	–	–	–	+
Обогащения топлива активной зоны	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Безопасность:										
– сейсмостойкость	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
– наличие пассивных элементов защиты	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
– возможность естественной циркуляции теплоносителя	–	–	+	–	–	–	+	+	–	–
ИТОГО	искл.	8	искл.	искл.	9	9	9	9	искл.	9

Полученный опыт эксплуатации на первых АЭС и АТЭЦ на базе ММР позволит в будущем поддерживать максимально высокий коэффициент использования их установленной мощности – т.е. обеспечит максимально возможное время их работы на номинальной мощности. Это будет достигаться за счет лучшего понимания эксплуатационных вопросов, применения опыта и минимизации времени плановых остановок блоков для перегрузки топлива и планово-профилактических ремонтов оборудования.

Помимо экономических преимуществ, такой подход позволит оптимизировать процесс развития атомной энергетики с позиции создания нормативной базы, кадрового обеспечения для функционирования АЭС и АТЭЦ, обеспечить возможность оперативного обмена опытом эксплуатации, оперативным персоналом, запасными частями, оборудованием и технологиями для строительства и поддержки эксплуатации АЭС и АТЭЦ. Все эти аспекты будут унифицированы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработка и внедрение атомных энергетических источников на базе ММР является перспективным направлением развития атомной энергетики в мире. В последние годы спрос на ММР интенсивно растет. Тем не менее, в настоящее время построены и находятся в стадии эксплуатации только два проекта ММР – PWR КЛТ-40С в составе плавучей АЭС «Академик Ломоносов» (Россия) и HTGR HTR-PM (Китай). Учитывая специфику данных реакторов необходимо отметить что, они слабо подходят для покрытия потребностей и удовлетворения условиям РК.

Принятие решения о внедрении АЭС и АТЭЦ на базе ММР в РК целесообразно только после появления положительного опыта эксплуатации наиболее подходящих для этого типов ММР, что ожидается в горизонте 2030-2035 гг. В настоящее время РК целесообразно сосредоточиться на развитии атомной энергетики на базе реакторов большой мощности, для чего уже существуют все необходимые возможности и предпосылки. Вместе с этим, перспективе внедрения ММР в РК также должно уделяться необходимое внимание. Необходимо планомерно и систематически анализировать тенденции и перспективы развития ММР, проводить соответствующие углубленные и масштабные исследования инфраструктуры и условий РК для обеспечения готовности строительства АЭС и АТЭЦ на базе ММР, как только это станет целесообразным и возможным (после появления референтных ММР, удовлетворяющих необходимым специфическим условиям).

В числе первоочередных задач, решаемых в данных исследованиях, необходимо выделить оценку в потребности и разработку плана внедрения атомных энергетических источников в РК на перспективу (включая замещение выбывающих и вновь планируемых к строительству угольных энергетических станций, и иных источников энергии с существенной

эмиссией парниковых газов). В рамках разработки плана предлагается в первую очередь рассмотреть районы, обладающие слаборазвитой электросетевой инфраструктурой, поскольку очевидным преимуществом внедрения ММР является децентрализация энергоснабжения и сокращение затрат на создание сетевой инфраструктуры. На базе данного плана становится возможным проведение углубленных исследований предполагаемых районов строительства с точки зрения возможности размещения в них АЭС и АТЭЦ на базе ММР, а также выделение в группе перспективных ММР конкретных типов, удовлетворяющих сформулированным в плане требованиям по установленной мощности единичного энергоблока и режимам работы реакторных установок.

Необходимо отметить, что не все проекты ММР могут быть рекомендованы к реализации в РК. Реакторы с быстрым нейтронным спектром имеют свою специфику эксплуатации и не могут быть рекомендованы к строительству в первую очередь по вопросам нераспространения. Перспективные типы реакторов на расплавах солей в настоящее время находятся в стадии разработки и имеют свои специфические проблемы, которые еще предстоит решить в обозримом будущем. Высокотемпературные газовые реакторы могут быть рассмотрены в качестве источников тепловой мощности в прикладных областях (производство водорода и т.п.). В рамках данной работы к строительству в РК в основном рекомендованы реакторы типа PWR, как обладающие наиболее обширным и длительным положительным опытом эксплуатации.

К сожалению, проведение адекватного экономического анализа проекта по строительству АЭС и АТЭЦ на базе ММР в настоящее время не представляется возможным. Это связано с отсутствием достоверных экономических и эксплуатационных данных (и соответствующего подтвержденного опыта эксплуатации). Необходимо отметить, что первые проекты ММР скорее всего будут иметь неоптимальные экономические показатели (высокие капитальные затраты на единицу удельной мощности) по отношению к предлагаемым сегодня реакторам большой мощности, поскольку в их стоимости будут учтены все соответствующие затраты на разработку, проведение различных НИР и ОКР и внедрение. В дальнейшем, за счет широкого охвата номенклатуры основного технологического оборудования реакторных установок, производимого в заводских условиях и сокращения в этой связи сроков сооружения энергетических станций в целом, стоимость строительства АЭС и АТЭЦ на базе конкретного типа ММР будет интенсивно снижаться.

При рассмотрении возможности внедрения в РК конкретных типов энергоблоков на базе ММР необходимо придерживаться принципа унификации. Предпочтительным является выбор варианта серийного строительства однотипных блоков (один поставщик технологий, тип реактора). Таким образом,

определенным преимуществом будут обладать линейки ММР имеющие в наличии РУ с различной установленной мощностью или возможность их гибкого масштабирования в рамках одной строительной площадки (единого ядерного острова) для покрытия как можно большего мощностного диапазона. Вместе с этим, необходимо принимать во внимание вопросы перспективы передачи технологий по производству топлива в РК.

Одним из вопросов проводимых исследований по перспективе развития и внедрения ММР в РК может быть изучение целесообразности создания в РК специализированного технологического парка по производству и испытаниям ММР и/или их основного технологического оборудования в сотрудничестве с одним из обладателей соответствующей технологии. Такой технологический парк может быть создан, к примеру, на базе РГП НЯЦ РК, где уже имеется существенный задел по необходимой инфраструктуре и кадровому обеспечению.

Финансирование

Работа выполнена при финансовой поддержке Комитета науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (Проект программно-целевого финансирования BR21882185 «Исследования в поддержку создания и безопасного функционирования атомной электростанции в Республике Казахстан»).

ЛИТЕРАТУРА

1. Прогнозный энергетический баланс Республики Казахстан до 2035 года / 1521-09. – Т. 1. – Версия V04. – ТОО «ESR».
2. Международное агентство по атомной энергии: офиц. сайт. – URL: <https://www.iaea.org/> (дата обращения 10.10.2023).
3. Advances in small modular reactor technology developments. / IAEA Advanced Reactors Information System (ARIS): офиц. сайт. – URL: <http://aris.iaea.org>. – 2020.
4. Малые модульные реакторы: проблемы и перспективы / ОЭСР: Развитие и экономика ядерных технологий. – АЯЭ. – № 7560. – 2020.
5. Merkulov, V. Analysis of small modular reactor technologies and socio-economic aspects of their application in the Russian Arctic in the era of digital transformation / V. Merkulov, N. Didenko, D. Skripnuk, S. Kulik // URL: https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/pdf/2023/39/e3sconf_transsiberia2023_10011.pdf. – E3S Web of Conferences 402. – 10011. – 2023.
6. Touré, A. Comparative assessment of SMR technologies / A. Touré, P. Monette // URL: <https://fermi.ce/wp-content/uploads/2020/02/10.20-tracetebl-smrs-comparative-assessment-20200128.pdf>. – 2020.
7. Small Modular Reactors: A new nuclear energy paradigm / the IAEA platform on small modular reactors and their applications. – URL: <https://smr.iaea.org>.
8. Соловьев, С.Л. Какие АСММ нам нужны? / С.Л. Соловьев; РОСЭНЕРГОАТОМ. – ВНИИАЭС. – Обнинск, 13 октября 2022 г.

9. Петрунин, В. В. Реакторные установки для атомных станций малой мощности / В. В. Петрунин; Вестник РАН, 2021. – Т. 91. – № 6. – С. 528–540.
10. Ожаровский, А. Балтийская АЭС: «перепроектирование» или смерть? / URL: <https://bellona.ru/2013/05/28/baltiyskaya-aes-pereproektirovanie/>. – 2013
11. Bin, XU CNNC's ACP100 SMR: Technique Features and Progress in China / XU Bin; 13th INPRO Dialogue Forum on Legal and Institutional Issues in the Global Deployment of Small Modular Reactors. – IAEA Headquarters. – Vienna. – 18-21 October 2016.
12. Delmastro, Dario F. Design and Technology Development of CAREM for Near-term deployment, and the Status of the construction of CAREM25 prototype / Dario F. Delmastro; Gerencia de Ingeniería. - First Meeting of the Technical Working Group for Small Modular Reactor (TWG-SMR). – Vienna. – April 2018.
13. Zhang, Z. Current status and technical description of Chinese 2x250 MWth HTR-PM demonstration plant / Zuoyi Zhang, Zongxin Wu и [др.] // Nuclear Engineering and Design. – Т. 239. – Вып. 7. – С. 1212–1219.
14. Magana, H. B. CAREM Prototype Construction and Licensing Status / H. Boado Magana, D. F. Delmastro, M. Markiewicz и [др.]; Comisión Nacional de Energía Atómica Av. del Libertador 8250. – (1429) Capital Federal. – Argentina.
15. Salah Ud-Din Khan, Techno-Economic Assessment of Fuel Cycle Facility of System Integrated Modular Advanced Reactor (SMART) / Salah Ud-Din Khan, Zeyad Almutairi and Meshari Alanazi; Sustainability 2021. – Vol. 13(21). – P. 11815. – URL: <https://doi.org/10.3390/su132111815>
16. Weimar, Mark R. Techno-economic Assessment for Generation III+ Small Modular Reactor Deployments in the Pacific Northwest / Mark R. Weimar, Ali Zbib, Don Todd и [др.]; Prepared for the U.S. Department of Energy under Contract DE-AC05-76RL01830. – Pacific Northwest National Laboratory Richland. – Washington 99354. – April 2021.
17. POCATOM. – URL: <https://rosatomnewsletter.com/ru/2020/09/28/nuclear-flexibility/>

REFERENCES

1. Prognoznyy energeticheskiy balans Respubliki Kazakhstan do 2035 goda / 1521-09. – Vol. 1. – Version V04. – TOO “ESR”.
2. Mezhdunarodnoe agentstvo po atomnoy energii: oficial. site. – URL: <https://www.iaea.org/> (access date 10.10.2023).
3. Advances in small modular reactor technology developments. / IAEA Advanced Reactors Information System (ARIS): oficial site. – URL: <http://aris.iaea.org/>. – 2020.
4. Malye modul'nye reaktory: problemy i perspektivy / OESR: Razvitie i ekonomika yadernykh tekhnologiy. – AYAE. – No. 7560. – 2020.
5. Merkulov, V. Analysis of small modular reactor technologies and socio-economic aspects of their application in the Russian Arctic in the era of digital transformation / V. Merkulov, N. Didenko, D. Skripnuk, S. Kulik // URL: https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/pdf/2023/39/e3sconf_transsiberia2023_10011.pdf. – E3S Web of Conferences 402. – 10011. – 2023.
6. Touré, A. Comparative assessment of SMR technologies / A. Touré, P. Monette // URL: <https://fermi.ce/wp-content/>

- uploads/2020/02/10.20-tractebel-smrs-comparative-assessment-20200128.pdf. – 2020.
7. Small Modular Reactors: A new nuclear energy paradigm / the IAEA platform on small modular reactors and their applications. – URL: <https://smr.iaea.org>.
 8. Solov'ev, S.L. Kakie ASMM nam nuzhny? / S.L. Solov'ev; ROSENERGOATOM. – VNIIAES. – Obninsk, 13 oktyabrya 2022 g.
 9. Petrunin, V. V. Reaktornye ustanovki dlya atomnykh stantsiy maloy moshchnosti / V. V. Petrunin; Vestnik RAN, 2021. – Vol. 91. – No. 6. – P. 528–540.
 10. Ozharovskiy, A. Baltiyskaya AES: “pereproektirovanie” ili smert’? / URL: <https://bellona.ru/2013/05/28/baltiyskaya-aes-pereproektirovanie/>. – 2013
 11. Bin, XU CNNC's ACP100 SMR: Technique Features and Progress in China / XU Bin; 13th INPRO Dialogue Forum on Legal and Institutional Issues in the Global Deployment of Small Modular Reactors. – IAEA Headquarters. – Vienna. – 18-21 October 2016.
 12. Delmastro, Darío F. Design and Technology Development of CAREM for Near-term deployment, and the Status of the construction of CAREM25 prototype / Darío F. Delmastro; Gerencia de Ingeniería. - First Meeting of the Technical Working Group for Small Modular Reactor (TWG-SMR). – Vienna. – April 2018.
 13. Zhang, Z. Current status and technical description of Chinese 2x250 MWth HTR-PM demonstration plant / Zuoyi Zhang, Zongxin Wu i [dr.]; Nuclear Engineering and Design. – Vol. 239. – Issue 7. – P. 1212–1219.
 14. Magana, H. B. CAREM Prototype Construction and Licensing Status / H. Boado Magana, D. F. Delmastro, M. Markiewicz i [dr.]; Comisión Nacional de Energía Atómica Av. del Libertador 8250. – (1429) Capital Federal. – Argentina.
 15. Salah Ud-Din Khan, Techno-Economic Assessment of Fuel Cycle Facility of System Integrated Modular Advanced Reactor (SMART) / Salah Ud-Din Khan, Zeyad Almutairi and Meshari Alanazi; Sustainability 2021. – Vol. 13(21). – P. 11815. – URL: <https://doi.org/10.3390/su132111815>
 16. Weimar, Mark R. Techno-economic Assessment for Generation III+ Small Modular Reactor Deployments in the Pacific Northwest / Mark R. Weimar, Ali Zbib, Don Todd i [dr.]; Prepared for the U.S. Department of Energy under Contract DE-AC05-76RL01830. – Pacific Northwest National Laboratory Richland. – Washington 99354. – April 2021.
 17. ROSATOM. – URL: <https://rosatomnewsletter.com/ru/2020/09/28/nuclear-flexibility/>

КАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫНДА ШАҒЫН МОДУЛЬДІК РЕАКТОРЛАР БАЗАСЫНДА ГЕНЕРАЦИЯЛАУ ҚУАТТАРЫН ЕНГІЗУ ПЕРСПЕКТИВАЛАРЫН ТАЛДАУ

Д. Б. Зарва¹, В. А. Витюк¹, В. А. Поспелов², С. А. Мүкенева^{1*}, М. Б. Шәріпов¹, А. В. Гулькин¹

¹ *Қазақстан Республикасының Ұлттық ядролық орталығы, Курчатов, Қазақстан*

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

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

Ұзақ мерзімді кезеңде энергияның қажетті көлеміне деген ішкі қажеттілікті кепілді түрде және сенімді қанағаттандыру кез келген мемлекет үшін аса маңызды міндет болып саналады. Қазақстанның қазіргі жағдайы үшін бұл міндет ерекше маңызды және өзекті, өйткені елдегі энергия өндірудің негізгі көздері көмірмен жұмыс істейтін жылу электр станцияларына негізделген, қазіргі уақытта олардың генерация құрылымындағы үлесі 70%-дан асады. Қолданыстағы жылу электр станциялары жоғары дәрежеде тозған және жалпы экологиялық жағдайға теріс әсер етеді.

Қазақстан Республикасында атом энергетикасын дамыту энергетика секторын әртараптандыру мәселелерін шешуге, елдің энергетикалық қауіпсіздігі мен тәуелсіздігін ұзақ уақыт бойы қамтамасыз етуге, сондай-ақ барынша қысқа мерзімде көміртегі бейтараптығына қол жеткізуді қамтамасыз етуге мүмкіндік беретін экологиялық таза энергия өндірісінің ұзақ мерзімді көзі ретінде қарастырылады.

Әлемдегі қазіргі атом энергетикасын дамытудың негізгі бағыттарының бірі – шағын модульдік реактор (ШМР) технологияларын ілгерілету. Бұл жұмыс қазіргі қолда бар ШМР жобаларына шолу және талдау жасауға, сондай-ақ оларды Қазақстан Республикасында енгізу талаптарын, перспективалары мен критерийлерін алдын ала талдауға арналған.

Түйін сөздер: атом энергетикасы, АЭС, ШМР, көміртегі бейтараптығы, атомдық энергетикалық технологиялар.

ANALYSIS OF THE PROSPECTS FOR IMPLEMENTATION OF POWER GENERATING FACILITIES
BASED ON THE SMALL MODULAR REACTORS IN THE REPUBLIC OF KAZAKHSTAN

D. B. Zarva¹, V. A. Vityuk¹, V. A. Pospelov², S. A. Mukeneva^{1*}, M. B. Sharipov¹, A. V. Gulkin¹

¹ *National Nuclear Center of the Republic of Kazakhstan, Kurchatov, Kazakhstan*

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

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

The most vital task for any state is long-term guaranteed and reliable satisfaction of internal energy needs in the necessary amount. This task is becoming particularly valuable and critical in the modern context of Kazakhstan, since the main sources of energy generation are based at coal thermal power plants, whose share in the structure generation nowadays is over 70%. All existing thermal power plants are in a state of severely deterioration and have negative impact on the environment.

The development of atomic energy in the Republic of Kazakhstan is regarded as a long-term source for producing clean energy that will allow to solve all aspects of industry diversification, ensure energy safety and independence for a long period of time and achieve carbon neutrality in the shortest possible time.

Advancement of small modular reactors (SMR) is one of the fundamental directions of modern atomic energy development worldwide. This paper is devoted to overview and analysis of currently available SMR projects, along with a preliminary analysis of their conditions, perspectives, and criteria for their implementation in the Republic of Kazakhstan.

Keywords: *atomic energy, NPP, SMR, carbon neutrality, atomic energy technology.*