



МРНТИ 55.38.29

<https://doi.org/10.32523/2616-7263-2024-149-4-381-397>

Обзорная статья

## Малые модульные реакторы. Их место в энергосистеме Казахстана

К.Ж. Аусенов<sup>1</sup>, Т.М. Жанткин<sup>1</sup>, А.А.Жанбирбаев<sup>1</sup>, Н.А.Карджаубаев<sup>2</sup>,  
М.К.Мукушева\*<sup>3</sup>, Р.К. Окасов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ТОО «Казахстанские атомные электрические станции»

<sup>2</sup>АО «Казахстанская компания по управлению электрическими сетями»

<sup>3</sup>РГП «Национальный ядерный центр РК» МЭ РК

(E-mail: \*mairak@list.ru)

**Аннотация.** Казахская энергетика сталкивается с серьезными проблемами, такими, как высокий уровень загрязнения от сжигания угля, дефицит электроэнергии и износ оборудования электрических станций. Решение может быть найдено в использовании возобновляемых источников энергии, строительстве атомных электростанций и развитии электрических сетей.

В последние годы в мировой энергетике многие страны проявляют огромный интерес к малым модульным реакторам, который обусловлен желанием уменьшить начальные капитальные затраты, так и возможностью обеспечения электроснабжением в изолированной энергосистеме.

Энергосистема Казахстана состоит из 3 зон: Северной, Южной и Западной. Западная зона работает изолированно от ЭЭС РК. Учитывая, что весь нефтегазовый сектор находится в данном регионе, необходимо обеспечить устойчивую работу электроснабжения субъектов. Анализ энергетического баланса запада показывает, что существующие мощности в перспективе не в состоянии покрыть растущие потребности [1]. Таким образом, отсутствие альтернативы строительства энергоисточников на углеводородном сырье в связи с необходимостью сокращать углеродный след, а также перспектива присоединения Западной зоны к ЭЭС РК позволяет применять энергоблоки мощностью более 300 МВт, что обеспечит бесперебойность электроснабжения региона и покроет дефицит энергосистемы.

В статье рассматривается проект «Безуглеродный энергокомплекс», который предусматривает строительство комплекса возобновляемой энергетики – ветряных и солнечных станций, объединенных с атомной электростанцией на базе малых модульных реакторов и использование систем накопления энергии.

В статье будут рассмотрены преимущества и недостатки рассматриваемых проектов малых модульных реактор (ММР), возобновляемых источников энергии (ВИЭ), накопителей энергии, и Smart grid, а также обоснованность и возможность реализации в Республике Казахстан проекта «Безуглеродный энергокомплекс».

**Ключевые слова:** атомная электростанция, малые модульные реакторы, безуглеродный энергокомплекс, возобновляемые источники энергии, ветровая энергетика, солнечная энергетика, гибридная генерация.

Поступила 03.09.2024. Доработана 18.12.2024. Одобрена 18.12.2024. Доступна онлайн 31.12.2024

<sup>1</sup>\*автор корреспонденции

## Введение

Стратегией «Казахстан – 2050»: новый политический курс состоявшегося государства» были поставлены четкие ориентиры на построение устойчивой и эффективной рыночной модели экономики при переходе страны на "зеленый" путь развития [2].

Долгосрочное видение перехода к "зеленой экономике" для Казахстана актуально для всех ключевых секторов экономического развития, включая электроэнергетику.

Развитие сектора электроэнергетики будет направлено на достижение углеродной нейтральности за счет увеличения доли возобновляемых источников энергии (далее – ВИЭ), а также развития технологий улавливания и хранения углерода (далее – УХУ) с постепенным сокращением угольной электрогенерации [2].

Одним из широко распространённых путей развития «зеленой экономики» в энергетическом секторе является гибридная система генерации, основанная на использовании преимуществ традиционных и альтернативных источников энергии. Гибридная генерация является эффективным и безболезненным способом перехода от сугубо традиционной генерации к генерации на основе ВИЭ [3-5].

Технический комплекс гибридной генерации «Безуглеродный энергокомплекс», рассматриваемый в статье, включает ВИЭ, совмещенные с АЭС на базе ММР и использованием накопителей энергии, совместная работа которых оптимизируется согласно графику нагрузки с помощью использования цифровой системы управления на базе технологии «умных сетей» (smart grid).

Согласно определению Международного агентства по атомной энергии (МАГАТЭ), к малым модульным реакторам относятся реакторы мощностью до 300 МВт, состоящие из модулей, которые перед доставкой и монтажом на площадке изготавливаются на заводе.

Малая энергетическая мощность ММР традиционно рассматривалась как недостаток в контексте принципа «экономии за счет масштаба». Однако учитывая модульность, упрощенный дизайн и применение пассивных систем безопасности, суждение об экономической эффективности исключительно на основе этого принципа может быть не совсем корректно.

Модульность реакторной установки приносит ряд потенциальных преимуществ. Во-первых, заводское изготовление деталей повышает качество компонентов, сокращает сроки строительства и обслуживания, а также обеспечивает безопасность процесса. Во-вторых, функциональные и системные испытания на заводе значительно сокращают время строительства станции, особенно при степени модульности выше 60%. Кроме того, поэтапное наращивание числа модулей при строительстве станции благоприятно влияет на экономику атомной энергетики, позволяя использовать доход от запуска первых реакторов для сокращения первоначальных инвестиций и потребности в кредитах. АЭС на базе ММР также предоставляют более гибкое управление мощностью станции и возможность размещения нескольких независимых модулей на одной площадке, что позволяет оптимизировать расходы и уменьшить общие эксплуатационные расходы. Увеличение количества модулей также снижает удельные затраты на вывод из эксплуатации, обеспечивая дополнительную экономию.

В Казахстане значительным из ВИЭ является потенциал ветровой и солнечной энергии. Примерно на 50% территории Казахстана средняя скорость ветра составляет 4-5 м/секунду на высоте 30 м, а годовая длительность солнечного света составляет 2200-3000 часов, а оцениваемая мощность 1300-1700 кВт на 1 м<sup>2</sup> в год, что превышает аналогичные показатели стран Европы. Наиболее высокий ветровой и солнечный потенциал имеется в районе Каспийского моря – в Атырауской и Мангистауской областях, а также перспективными районами для развития ветроэнергетики являются Алматинская, Акмолинская, Жамбылская области. По данным Концепции развития топливно-энергетического комплекса Республики Казахстан до 2030 года, ветровой потенциал Казахстана составляет 920 миллиардов кВтч/год, а солнечной потенциал – 2,5 миллиардов кВтч/год [6].

Для обеспечения бесперебойного электроснабжения потребителей в периоды маловетренной (безветренной) и облачной погоды автономные или небольшие ВЭС и СЭС (работающие на автономную сеть) используются совместно с накопителями (аккумуляторные батареи) с резервированием мощности.

Для реализации проекта «Безуглеродный энергокомплекс», включающий в себя как ВИЭ, так и АЭС вместе с накопителями энергии, необходима система «умной диспетчеризации» (smart grid) для эффективного управления элементами энергокомплекса в соответствии и с учетом запросов Системного оператора.

## Методология

Проект «Безуглеродный комплекс». Перспективы и возможности малых модульных реакторов в Казахстане

Ежегодно казахстанские ТЭЦ и ГРЭС для получения электроэнергии сжигают около 60 миллионов тонн угля. Выбросы станций разрушительно действуют на экологическую обстановку, а загрязненность воздуха жители мегаполисов с недовольством ощущают на себе. Учитывая, что 78% казахстанской энергии вырабатывается за счет сжигания угля, ситуация будет только ухудшаться.

По состоянию на 1 января 2024 года объем общей располагаемой мощности составил 20,4 ГВт при рабочей мощности 15,4 ГВт. Максимум потребления в текущий осенне-зимний период составил 16,6 ГВт, а максимум генерации – 15,1 ГВт [6]. Таким образом, дефицит электроэнергетической мощности составил 1,5 ГВт.

Тренд на увеличение энергодефицита в стране будет продолжаться. Согласно утвержденного баланса мощности к 2030 году при необходимом уровне резерва 17% потребность электрической мощности составит 28,2 ГВт. При этом располагаемая мощность с учетом ввода новых мощностей составит 22 ГВт. Объем дефицита электрической мощности в Единой электроэнергетической системе РК даже с учетом ввода порядка 4 ГВт новых мощностей превышает 6 ГВт [7].

Потребность в новых мощностях может оказаться выше в случае более интенсивного внедрения цифровых технологий, электрификации транспорта, индустриализации и т.п.

Проблема усугубляется износом генерирующего оборудования на ГРЭС и ТЭЦ. В настоящее время более половины эксплуатируемого генерирующего оборудования находится в работе свыше 30 лет. Данный фактор сказывается на показателях аварийности электростанций и на их КПД. Износ мощностей по станциям составляет около 70%. Дефицит мощности в настоящее время покрывается за счет внеплановых перетоков от сопредельных государств, что ставит под угрозу энергетическую безопасность страны.

Из прогнозного баланса Республики Казахстан следует, что к 2030 году в Западной зоне прогнозируется дефицит в размере 864 МВт [1]. Наиболее перспективной с точки зрения выработки электрической энергии в децентрализованных зонах является гибридная система с несколькими источниками электрической энергии, использующими не менее двух разных технологий производства электроэнергии.

Гибридизация является самым верным решением для устойчивой трансформации традиционной энергосистемы Западного Казахстана в энергосистему, основанную на ВИЭ, ММР при плавном и максимально эффективном использовании существующей энергоинфраструктуры локальной энергетики.

Соответственно, в целях снижения данного дефицита актуальным является реализация проекта «Безуглеродный энергокомплекс» с установленной мощностью до 800 МВт в Атырауской области (далее – Энергокомплекс).

В планах АО «KEGOC» до 2040 года имеются перспективные проекты по объединению энергосистемы Западного Казахстана с ЭЭС Казахстана.

Проекты АО «KEGOC» открывают перспективы для атомной генерации Западного энергоузла для покрытия дефицита мощности по сетям АО «KEGOC» в Южном регионе Казахстана.

## **Результаты и Обсуждение**

### **Малые модульные реакторы**

Для большинства ММР характерна интегральная компоновка реакторной установки, при которой активная зона, парогенератор, компенсатор давления и ряд других видов оборудования собраны в едином корпусе – моноблоке, изготавливаемом в заводских условиях и поставляемом в готовом виде на площадку. Данная особенность компоновки не только облегчает транспортировку и положительно сказывается на капитальных затратах, но и в целом повышает внутреннюю самозащищенность реакторной установки.

Более высокий уровень безопасности ММР по отношению к внешним воздействиям природного и техногенного характера иногда достигается за счет подземного размещения реакторной установки.

Для использования в проекте «Безуглеродный энергокомплекс» нами рассматриваются два ММР американской разработки – BWRX-300 и ММР NuScale.

### **ММР BWRX-300**

BWRX-300 – это малый модульный реактор мощностью 300 МВт электрической мощности и 870 МВт тепловой мощности с естественной циркуляцией теплоносителя,

водяным охлаждением и пассивными системами защиты. BWRX-300 является эволюционным продолжением американских реакторов ESBWR-1520, лицензированных Комиссией США по ядерному регулированию (NRC). Он предназначен для гибкой выработки чистой энергии в течение 60 лет, которая может конкурировать по стоимости с установками на природном газе.

Разработкой данного реактора в США занималась компания «GE-Hitachi Nuclear Energy» (GEN), а в Японии – «Hitachi GE Nuclear Energy» (HGNE).

BWRX-300 позиционируется как десятое поколение кипящих реакторов (BWR) и обладает простой и инновационной конструкцией.

Несмотря на то, что конструкция BWRX-300 в основном соответствует традиционным кипящим реакторам на легкой воде – BWR, она включает в себя несколько технических конструктивных особенностей, таких, как система естественной циркуляции воды, подземное размещение реактора и большое количество новшеств в системах безопасности.

Маневренность BWRX-300 позволяет ежедневно отслеживать нагрузку, что может быть использовано, например, для компенсации влияния на сеть переменной возобновляемой энергии. Функция отслеживания нагрузки находится в диапазоне от 50 до 100% номинальной мощности реактора со скоростью разгона до  $\pm 0,5\%$  в минуту. Использование BWRX-300 для регулирования частоты нежелательно.

При работе в маневренном режиме требуется проведение предварительной подготовки топлива с учетом конкретной специфики эксплуатации.

Для BWRX-300 опционально выбирается 12- или 24-месячный цикл перегрузки. Продолжительность перегрузки, согласно данным GE-Hitachi, должна составлять 10-20 дней для 12-24 месячного цикла перегрузки.

BWRX-300 полностью соответствует определению МАГАТЭ «проверенной технологии», так как большинство ядерных технологий и компонентов, используемых в проекте BWRX-300, либо имеют многолетний опыт реальной эксплуатации, либо прошли всесторонние испытания и лицензирование в рамках проекта ESBWR.

BWRX-300 проходит лицензирование в нескольких странах. В США и Канаде ведутся мероприятия по лицензированию дизайна реактора, а в Великобритании BWRX-300 завершил оценку зрелости технологии, финансируемую министерством по делам бизнеса, энергии и промышленной стратегии (BEIS). Регуляторная деятельность по лицензированию в других странах начнется по мере необходимости и по мере развития соответствующей коммерческой деятельности.

В рамках процедуры лицензирования в NRC (Комиссия по ядерному регулированию США) и в CNSC (Комиссия по ядерной безопасности Канады) поданы первые тематические отчеты.

### **MMP NuScale**

NuScale – малый модульный реактор интегрального типа с водой под давлением. Электрическая мощность энергомодуля (далее – NPM) составляет 77 МВт при тепловой мощности 200 МВт. Срок службы MMP NuScale составляет 60 лет.

Проект малого модульного реактора NuScale возник в результате исследований, проведенных в Университете штата Орегон. Концепция была разработана доктором Хосе Рейесом (José Reyes), профессором ядерной инженерии, который стал сооснователем компании NuScale Power в 2007 году. На раннем этапе разработка технологии NuScale поддерживалась финансированием Министерства энергетики США (DOE), которое предоставило гранты на первоначальные исследования и разработки.

Каждый модульный реактор работает независимо в мультимодульной конфигурации. Возможно контролировать и управлять до 12 модулей из одной диспетчерской.

Маневренность MMP NuScale в режиме для отслеживания суточного графика нагрузки осуществлена в диапазоне от 20% до 100% со скоростью набора мощности 0,7% в минуту и снижения мощности 3,3% в минуту.

Также стоит отметить, что конструкция NuScale предусматривает три различных варианта маневрирования: обход подачи пара на турбину с помощью байпасных клапанов, регулирование мощности стержнями СУЗ и посредством отключения модулей.

В системе охлаждения NPM используется естественная циркуляция под действием силы тяжести во всех режимах: нормальном, переходном, останове и аварийном.

Охлаждение реактора может поддерживаться неопределенное количество времени и не требует вмешательства оператора – данный эффект достигается за счет использования пассивных систем и бассейна реактора.

За счет меньшей энергонапряженности реактора, упрощения конструкции, наличия пассивных систем безопасности в NuScale удалось снизить размер зоны аварийного планирования со стандартных 10 миль до границы площадки.

Подземное размещение станции способствует как физической, так и радиационной защите. Топливный цикл реактора NPM составляет 24 месяца. Продолжительность перегрузки составляет 10 дней.

В августе 2020 года конструкция NuScale 50 МВт была утверждена NRC.

NuScale Power также заключила соглашения о развертывании MMP в таких странах, как Польша, Румыния, Чешская Республика и Иордания, включая окончательное соглашение с польским производителем меди и серебра KGHM Polska Miedź SA о работе над развертыванием первой установки VOYGR в Польше также в 2029 году.

### **Оценка технологий малых модульных реакторов в соответствии с системой критериев реакторных технологий.**

Для сравнительной оценки предложенных технологий была разработана система критериев оценки, основанная на рекомендациях МАГАТЭ и казахстанских нормативных документах. [8]

Оценка осуществлялась по балльной системе в 10 баллов для каждого критерия. В случае неполного или полного несоответствия критерию баллы уменьшались или обнулялись. При превышении установленных параметров оценки баллы добавлялись. Дополнительно прибавлялось по одному баллу за каждый реактор, находящийся в процессе строительства или уже находящийся в эксплуатации.

Критерии, которым потенциально соответствуют все проекты реакторов, имеют сниженный вес 0,5.

Кроме того, с учетом того, что современные реакторы проектируются с соблюдением высоких требований по безопасности, ожидается соответствие этих проектов критериям наличия защиты от внешних воздействий, радиационной безопасности персонала и населения. Проектируемая защита от внешних воздействий большинства проектов реакторов способна выдержать падение тяжелого самолета и экстремальные воздействия природного характера, а проектные дозы находятся в пределах норм, либо намного ниже нормативных требований. В этой связи этим критериям также присвоен вес 0,5.

С другой стороны, важными критериями являются критерии соответствия заданному мощностному диапазону, а также характеризующие проработанность проекта – наличие лицензий и референтность. Эти критерии имеют больший вес – 1,5.

Для оценки нормированного соответствия рассматриваемых проектов системе критериев выполнено умножение баллов, полученных при ранжировании каждого критерия по соответствующему ему весу.

Проведена оценка и ранжирование реакторных технологий ММР на основе их актуализированных необязывающих технико-коммерческих предложений в соответствии с разработанной системой оценочных критериев.

Оценки и ранжирование выполнены на основе представленных вендорами данных необязывающих технико-экономических предложений, содержащих показатели рассмотренных технологий без учета других (например, политических) факторов, которые могут оказать влияние на выбор поставщика АЭС. Следовательно, в работе при оценке проектов не рассмотрены такие существенные риски, как:

- доступ к мировой цепочке поставок и оборудованию мировых поставщиков;
- риски сбоя поставок качественного оборудования;
- санкционные риски;
- валютные риски.

Получены следующие результаты:

1. NuScale VOYGR (США) – **203 баллов;**
2. BWRX-300 (США, Япония) – **186 баллов.**

## **Возобновляемые источники энергии (ВИЭ)**

### **Анализ ветрового потенциала Западной области**

Предварительные данные по ветровому и солнечному потенциалу рассматриваемого района размещения [9-11]:

1. Среднегодовая скорость ветра составляет на высотах:
  - 10 м – 4,6 м/с (флюгер);
  - 50 м – 5,7 м/с;
  - 100 м – 6,6 м/с.

2. Среднегодовое количество штилей на высоте флюгера – 19 дней, на высоте от 50 до 100 м – 11 дней.

3. Преобладающие направления ветра северный, северо-восточный, восточный и юго-восточный. Среднегодовое количество штилей – 11 дней.

В годовом разрезе по району преобладают ветры юго-восточного направления, имеющие повторяемость 23%. Наименьшую повторяемость имеют ветры Юг, ЮЗ и Западных направлений, в сумме имеющие повторяемость 19%. Штили составляют 9%. Во все месяцы года, исключая летние, преобладают ветры юго-восточного направления, летом преобладают ветры северного направления, имеющие повторяемость 22%.

Указанный район характеризуется умеренной ветровой нагрузкой со средней скоростью ветра на высоте флюгера несколько ниже необходимой для размещения ВЭС большой мощности.

В настоящее время ведущие производители мира освоили выпуск ВЭС мощностью от нескольких сотен киловатт до нескольких мегаватт. Наибольшее распространение из установок, подсоединяемых к сети, получили ВЭС со средней единичной мощностью до 2 МВт. Наряду с этим на серийный уровень выходят установки до 2-3 МВт и более.

Для предварительных оценок в качестве ветровой энергоустановки для размещения на площадке в составе ВЭС рассмотрена типовая ВЭС лопастного типа со следующими основными характеристиками:

- установленная электрическая мощность – 2,1 МВт при расчетной скорости ветра 13 м/с;
- диаметр ротора 114 м;
- высота башни 100 м.

Для предварительных оценок принимаем среднюю скорость ветра на высоте оси ротора (~ 100 м) равной 6,6 м/с. При заданной средней скорости ветра (исходя из кубической зависимости мощности от скорости ветра) и с учетом повышающего коэффициента 1,91 (учитывающего реальное распределение скоростей в разрезе года при предварительных оценках) средняя мощность рассматриваемой ВЭС составит примерно 840 кВт. Таким образом, коэффициент использования установленной мощности (КИУМ), заданной ВЭС, составляет 40 %.

Надежность электроснабжения потребителей и высокое качество поставляемой электроэнергии являются на данный момент одним из основных требований к энергоисточникам централизованных и децентрализованных энергосистем.

В связи с этим в проекте Энергокомплекса планируется использование системы накопления энергии (СНЭ). Ниже приведен график согласования генерации ВЭС с графиком нагрузки для более точной информации о совместной работе СНЭ с ВЭС.



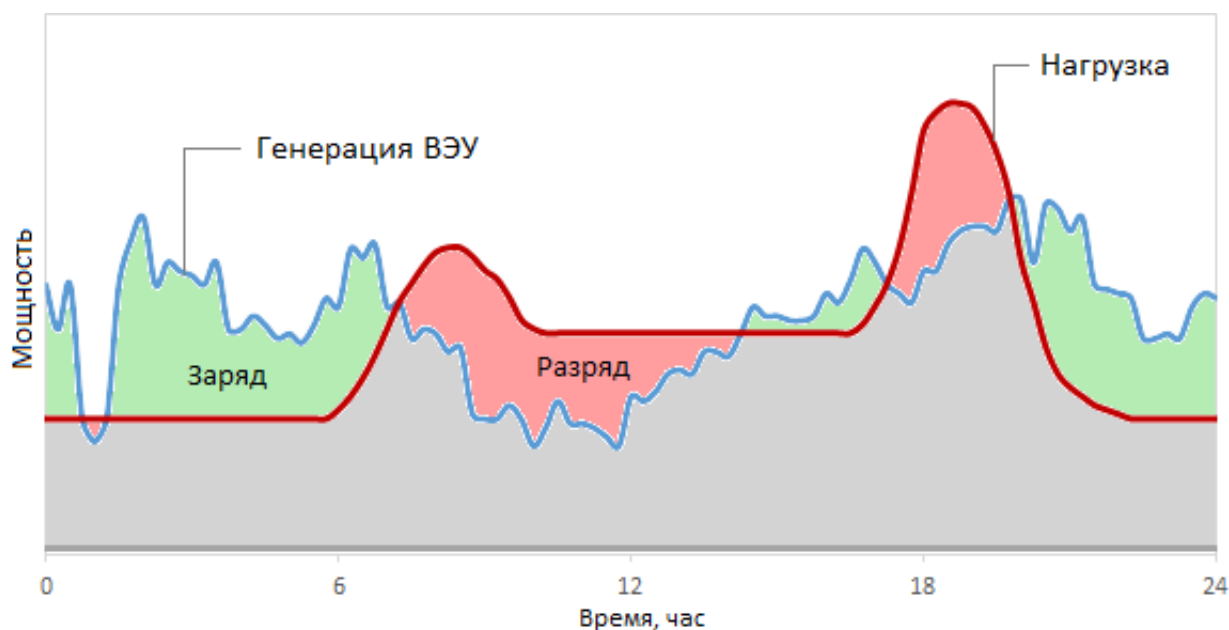


Рисунок 1. График потребления мощности при параллельной работе СНЭ с ветровой электростанцией.

Основная проблема ветрогенерации – неравномерность и непредсказуемость графика генерируемой мощности. СНЭ позволяет согласовать график выдаваемой в нагрузку мощности с типовым графиком потребления, заряжая СНЭ в период генерации и разряжая в период дефицита генерируемой мощности.

Кроме того, СНЭ позволяет предотвратить колебания режимных параметров (напряжения, частоты – в случае изолированной энергосистемы), к которым приводят резкие изменения мощности, генерируемой ВЭУ.

### Анализ солнечного потенциала Западной области

Предварительные данные по солнечному потенциалу рассматриваемого района размещения показали, что за многолетний период среднегодовая температура воздуха составила 11,2 °С. В годовом ходе температуры воздуха самым холодным месяцем является январь – минус 2,6°С, наиболее теплым – июль – плюс 37°С [9].

Солнечная энергетика является более регулируемым и прогнозируемым источником энергии, чем ВЭС. Выработка СЭС зависит от сезона. Соответственно, выдача электроэнергии с СЭС отличается неравномерностью как в суточном, так и в недельном, месячном, годовом и многолетнем разрезе.

Как и ранее было сказано, в проекте Энергокомплекса планируется использовать СНЭ. Ниже приведен график согласования генерации солнечной электростанции с графиком нагрузки для более точной информации о совместной работе СНЭ с СЭС.

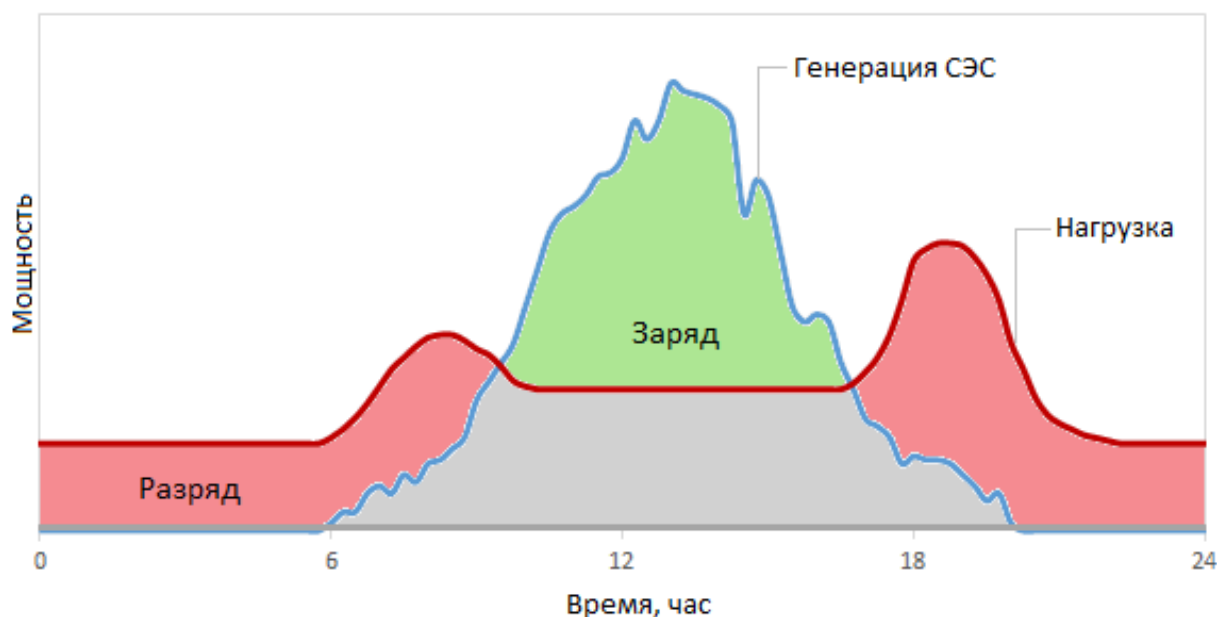


Рисунок 2. График потребления мощности при параллельной работе СНЭ с солнечной электростанцией.

Основная проблема солнечной генерации – неравномерность графика генерируемой мощности, его зависимость от времени суток и от погодных условий. Применение СНЭ позволяет согласовать график мощности, выдаваемой в нагрузку, с графиком потребления. При этом СНЭ заряжаются в период избыточной генерации и разряжаются в период дефицита генерируемой мощности.

Исходя из всего вышесказанного, можно сделать вывод, что солнечный потенциал Западного Казахстана большой. В зависимости от установленной мощности станции генерация СЭС в жаркие летние дни достигает 80%, а зимние дни 50%.

### Системы накопления энергии

Система накопления электрической энергии (СНЭ) предназначена для накопления, хранения электрической энергии и отдачи ее в сеть или нагрузку с целью поддержания функционирования энергосистемы, повышения эффективности ее работы и обеспечения требуемого качества электрической энергии. СНЭ – многофункциональное устройство, способное управлять активной и реактивной мощностью, а также компенсировать несинусоидальный ток и несимметрию трёхфазной системы. Возможности СНЭ позволяют решать широкий ряд задач, актуальных как для объектов, подключенных к единой энергосистеме (далее – сеть), так и для объектов с автономным энергоснабжением (изолированных энергосистем с ВИЭ или другими источниками энергии).

Существуют разные режимы работы СНЭ [12]:

- а) режим заряда (приема мощности из сети);
- б) режим параллельной работы с сетью на нагрузку (режим источника мощности);

- в) автономный режим;
- г) режим выдачи мощности в сеть.

Применение СНЭ позволяет согласовать график мощности, выдаваемой в нагрузку, с графиком потребления. При этом СНЭ заряжаются в период избыточной генерации и разряжаются в период дефицита генерируемой мощности.

Кроме того, СНЭ позволяет предотвратить колебания режимных параметров (напряжения, частоты – в случае изолированной энергосистемы), к которым приводят резкие изменения мощности, генерируемой ВЭУ.

Установка СНЭ в энергосистеме позволяет переложить на нее функции согласования графиков нагрузки и генерации ВИЭ. При этом ММР может работать в «базовом режиме», постоянно отдавая в нагрузку установленную мощность. За счет этого обеспечивается минимизация удельного расхода топлива и моторесурса.

Кроме того, СНЭ может выступать как источник высокоманевренной резервной мощности, решая проблемы динамической устойчивости межсистемных перетоков.

В режиме параллельной работы с энергосистемой, где рассматривается данный проект, при выдаче/приеме постоянной мощности происходит разряд (заряд) аккумуляторной батареи подсистемы накопления СНЭ. При достижении критических значений степени заряженности СНЭ может отключиться по аварии, при этом возникнет резкий скачок мощности в сети, что негативно повлияет на стабильную работу сети в целом.

В проекте «Безуглеродный энергокомплекс» рассматривается возможность использования системы накопления энергии мощностью порядка 300 МВт.

### **Технологии «умной автоматики» Smart Grid**

Безуглеродный энергокомплекс можно рассматривать как виртуальную электростанцию в концепции распределенной генерации с использованием технологии «умной автоматики» (smart grid). Система умной диспетчеризации энергоисточников вместе с общим использованием ими отдельных компонентов комплекса позволит оптимизировать технические и экономические показатели, в первую очередь, ВИЭ, и обеспечит высокое качество выдаваемой в национальную сеть электроэнергетики.

Предлагаемый функционал автоматики управления режимом параллельной работы энергокомплекса с сетью внешней энергосистемы обеспечит безопасный и надежный режим электрической сети для объектов распределенной генерации. В проекте «Безуглеродный энергокомплекс» рассматривается совместное функционирование ВИЭ, ММР и СНЭ через каналы связи, соединяясь с интеллектуальной автоматикой, и тем самым обеспечивая надежную работу как в автономном режиме, так и в параллельном.

### **Заключение**

Концепцией перехода Республики Казахстан к зелёной экономике предусмотрено

увеличение доли альтернативных источников энергии до 50% к 2050 году [1]. Возобновляемая энергетика (ВИЭ) имеет свою нишу в энергосистеме, но не может гарантированно обеспечить бесперебойную энергию. Достичь целей устойчивого развития и перехода к безуглеродной «зеленой» экономике возможно только с помощью надежной базовой энергетике страны. Энергетическая безопасность страны может быть достигнута только бесперебойными источниками энергии, которые обеспечивают энергию 24/7.

В этих условиях одним из перспективных направлений является интеграция АЭС и ВИЭ в единый энергокомплекс, что позволяет снизить негативные экономические показатели ВИЭ и эффективно компенсировать как экономические потери, так и технические недостатки ВИЭ, связанные с нестабильностью генерации.

Авторами предлагается рассмотреть возможность использования ММР реакторов в системах гибридной генерации, где атомные энергоблоки совмещены с ВИЭ. Это позволяет демпфировать негативные технические и экономические параметры ВИЭ на уровне такого энергокомплекса.

Безуглеродный энергокомплекс может быть размещен в разных регионах Казахстана в зависимости от потребности в энергии, доступности необходимых ресурсов (например, воды для охлаждения), инфраструктуры и т.д. При этом данные реакторы могут стать альтернативой выбывающим источникам угольной генерации и использованы также в теплоснабжении.

В Казахстане атомные реакторы малой мощности могли бы бесперебойно снабжать экологически чистой электроэнергией нефтяные и газовые платформы на Каспии, а также труднодоступные населенные пункты, где по техническим или экономическим соображениям невозможно наладить производство электроэнергии другими способами.

ВИЭ большой мощности наиболее целесообразно использовать в составе большой энергосистемы, которая компенсирует нестабильность работы ВИЭ за счет резерва мощностей. Учитывая, что энергосистема сама имеет неоднородности энергонагрузки (пики и провалы энергопотребления), регулировать которые объекты ВИЭ не сможет, введение значительной доли ВИЭ в энергосистему способствует ее дестабилизации. Проблемы в сетях и диспетчеризации энергосистем из-за нестабильности работы ВИЭ начинаются после достижения ими доли свыше 20 % от общей установленной мощности энергосистемы. По имеющимся данным, зарубежные энергосистемы не всегда охотно подключают ВИЭ к энергосетям, что привело к появлению законодательных актов, обязывающих их это делать.

Реализация энергокомплекса позволит обеспечить высокую надежность вырабатываемой электроэнергии, выдаваемой комплексом в энергосистему, за счет локального балансирования генерации блоков (элементов) комплекса, а также улучшить технико-экономические показатели ВИЭ. Энергокомплекс можно рассматривать как виртуальную электростанцию в концепции распределенной генерации. Виртуальная электростанция представляет собой систему, которая управляет распределенными энергоресурсами так, чтобы они действовали как одно целое, обеспечивая гибкость, эффективность и снижение затрат.

Работа выполнена в рамках проекта МНТЦ К-2779 «Development of a Prefeasibility Study for a Conceptual Project of a Carbon-Free Power Complex Consisting of Renewable Energy Technologies Combined with Small Modular Reactors» и в рамках научно-технической программы «Развитие атомной энергетики в Республике Казахстан» (ИРН – BR24792713).

### **Вклад авторов**

Все авторы внесли эквивалентный вклад в подготовку публикации.

**Аусенов К.Ж.** – обзор и анализ перспективных технологий ММР.

**Жанткин Т.М.** – научное руководство проектными исследованиями, обсуждение результатов.

**Жанбирбаев А.А.** – обзор и анализ возобновляемых источников энергии.

**Карджаубаев Н.А.** – обзор и анализ энергетических сетей, систем хранения энергии.

**Мукушева М.К.** – участие в постановке задачи аналитических исследований, обсуждение результатов, написание и редактирование статьи.

**Окасов Р.К.** – обзор и анализ цифровых систем управления (технология smart grid).

### **Список литературы**

1. Приказ Министра энергетики Республики Казахстан от 11 января 2024 года № 11 «Об утверждении прогнозных балансов электрической энергии и мощности в единой электроэнергетической системе Республики Казахстан на период с 2024 по 2030 годы».
2. Указ Президента Республики Казахстан «О концепции по переходу республики Казахстан к "зеленой экономике"» от 30 мая 2013 года № 577.
3. Коваленко Е.В., Тягунов М.Г. Гибридные энергетические комплексы с когенерацией в изолированных энергетических системах // Альтернативная энергетика и экология (ISJAEE). 2015;(10-11):167-177. <https://doi.org/10.15518/isjaee.2015.10-11.015>
4. Васьяков А.Г., Коваленко Е.В., Тягунов М.Г., Шарапов С.А. Использование гибридных энергокомплексов на основе возобновляемых источников энергии в распределенной энергетике // Энергетик. 2014. № 2. С. 25-27.
5. Мартынов А.В. Децентрализованные системы теплоснабжения // Новости теплоснабжения. 2006. № 7. С. 24-27.
6. Постановление Правительства «Об утверждении Концепции развития топливно-энергетического комплекса Республики Казахстан на 2023-2029 годы» от 28 июня 2014 года № 724.
7. Отчет министра энергетики Республики Казахстан <https://primeminister.kz/ru/news/mine-nergo-razrabotal-plan-meropriyatiy-po-razvitiyu-elektroenergeticheskoy-otrasli-budut-vvedeny-26-gvt-novykh-generiruyushchikh-moshchnostey-26978>
8. Нормы МАГАТЭ по безопасности [Электрон.ресурс] <https://www.emd-international.com/windpro/windpro-modules/4-0-features/>
9. [https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg\\_tools/en/](https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/) [Электрон.ресурс]
10. <https://stat.gov.kz/ru/> [Электрон.ресурс]
11. <https://www.emd-international.com/windpro/windpro-modules/4-0-features/>
12. Илюшин П.В. Повышение надежности функционирования распределительных электрических сетей за счет эффективного применения систем накопления электроэнергии // Электроэнергия. Передача и распределение. - 2022-№6 (75) - С. 64-74.

**Қ.Ж.Аусенов<sup>1</sup>, Т.М.Жантикин<sup>1</sup>, Ә.А.Жаңбырбаев<sup>1</sup>, Н.А.Қарджаубаев<sup>2</sup>,  
М.К.Мукушева<sup>3</sup>, Р.Қ.Оқасов<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Қазақстандық атом электр станциялары

<sup>2</sup>Электр Желілерін Басқару Жөніндегі Қазақстан Компаниясы

<sup>3</sup>«Қазақстан Республикасының Ұлттық ядролық орталығы» РМҚ

## **Шағын модульдік реакторлар. Олардың Қазақстанның энергетикалық жүйесіндегі орны**

**Андатпа.** Қазақстандық энергетикада күрделі проблемалар: көмірді жағудан ластанудың жоғары деңгейі, электр энергиясының тапшылығы және электр станциялары жабдықтарының тозуы туындауда. Шешімді атом электр станцияларын салу және электр желілерін дамыту арқылы табуға болады, бұл ел үшін электр энергиясының таза және сенімді көзі ретінде шағын модульдік реакторларды дамыту келешегін ашады.

Көптеген елдер шағын модульдік реакторларға үлкен қызығушылық танытады, бұл күрделі шығындарды азайту, сол сияқты салыстырмалы төмен сыйымдылықтағы электр жүйелерінде пайдалану мүмкіндігіне де байланысты.

Қазақстандағы энергожүйе 3 аймақтан тұрады: Солтүстік, Оңтүстік және Батыс, соңғысы ҚР БЭЖ-дан оқшауланып жұмыс істейді. Барлық мұнай-газ секторы осы өңірде екенін ескере отырып, субъектілерді электрмен жабдықтаудың тұрақты жұмысын қамтамасыз ету қажет. Батыстың энергетикалық балансын талдау, сондай-ақ елдің үлкен экономикалық және экологиялық шығындарына әкелетін өнеркәсіптік тұтынушыларды электрмен жабдықтаудың жиі үзілуі, өзінің пайдалану ресурсын толық пайдаланатын энергия көздерін жиі пайдаланудан шығару салдарынан қолданыстағы қуаттар болашақта өсіп келе жатқан қажеттіліктерді жаба алмайтынын көрсетеді. [1]. Осылайша, көмірсутегі ізін азайту қажеттілігіне байланысты көмірсутекті шикізатты пайдалана отырып, энергия көздерін салуға баламаның жоқтығы, сондай-ақ Батыс аймағын Қазақстан Республикасының Бірыңғай энергетикалық жүйесіне қосу перспективасы оны құрайды. қуаттылығы 300 МВт-тан астам энергоблоктарды пайдалану мүмкіндігі бар, бұл өңірді үздіксіз электрмен жабдықтауды қамтамасыз етеді және энергия жүйесінің тапшылығын өтейді.

Мақала авторлары шағын модульдік реакторлар базасындағы атом электр станцияларымен біріктірілген жаңартылатын энергетика кешенін – жел және күн станцияларын салуды және энергияны сақтау жүйелерін пайдалануды көздейтін «Көміртексіз энергия кешені» жобасын қарастыруда. Энергетикалық кешен элементтерінің бірлескен жұмысы smart grid технологиясына негізделген сандық басқару жүйесін пайдалану есебінен жүктеме кестесіне сәйкес оңтайландырылады.

Шолуда ШМР, ЖЭК, энергия жинақтағыштардың және Smart Grid қарастырылып жатқан жобаларының артықшылықтары мен кемшіліктері, сондай-ақ Қазақстан Республикасында «Көміртексіз энергия кешені» жобасын іске асырудың негізділігі мен мүмкіндігі қаралатын болады.

**Түйін сөздер:** атом электр станциясы, шағын модульдік реакторлар, көміртексіз энергия кешені, жаңартылатын энергия көздері, жел энергетикасы, күн энергетикасы, гибридті генерация.

**K.Zh.Aussenov<sup>1</sup>, T.M.Zhantikin<sup>1</sup>, A.A.Zhanbirbayev<sup>1</sup>, N.A.Karjaubayev<sup>2</sup>,  
M.K.Mukusheva<sup>3</sup>, R.K.Okasov<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Kazakhstan Nuclear Power Plants LLP

<sup>2</sup>Kazakhstan Electricity Grid Operating Company

<sup>3</sup>RSE «National Nuclear Center» RK

### **Small modular reactor. Its place in the energy system of Kazakhstan**

**Abstract.** Kazakhstan's energy sector is facing significant challenges, including a high level of pollution caused by coal combustion, electricity shortages, and deterioration of energy station equipment. The solution lies in the construction of nuclear power plants and the development of power grids, which open up opportunities for the development of small modular reactors as a clean and reliable source of electric power.

Many countries express their huge interest in small modular reactors due to their desire to reduce capital expenses and their potential to integrate into power systems with lower capacity.

The energy system of Kazakhstan consists of 3 zones: Northern, Southern and Western. The western zone operates in isolation from the Unified Energy Network of the Republic of Kazakhstan. Considering that the entire oil and gas sector is located in this region, it is necessary to ensure stable operation of the electricity supply to the subjects. An analysis of the energy balance of the West shows that existing capacities in the future are not able to cover growing needs. [1]. Thus, the lack of an alternative to the construction of energy sources using hydrocarbon raw materials due to the need to reduce the carbon footprint, as well as the prospect of joining the Western zone to the Unified Energy System of the Republic of Kazakhstan, makes it possible to use power units with a capacity of more than 300 MW, which will ensure uninterrupted power supply to the region and cover the deficit of the energy system.

The authors of the article consider the project "Carbon-free energy complex," which involves the construction of a renewable energy complex - wind and solar power plants combined with a nuclear power plant based on small modular reactors and the use of energy storage systems.

The review will examine the advantages and disadvantages of SMR, RES, energy storage and Smart Grid projects, as well as the feasibility and feasibility of implementing the "Carbon-Free Energy Complex" project in Kazakhstan.

**Keywords:** nuclear power plant, small modular reactors, carbon-free energy complex, renewable energy sources, wind energy, solar energy, hybrid generation.

### **References**

1. Prikaz Ministra energetiki Respubliki Kazahstan ot 11 yanvarya 2024 goda № 11 «Ob utverjdenii prognoznyh balansov elektricheskoi energii i moshnosti v edinoi elektroenergeticheskoi sisteme Respubliki Kazahstan na period s 2024 po 2030 gody».
2. Ukaz Prezidenta Respubliki Kazahstan «O koncepcii po perekhodu respubliki Kazahstan k "zelenoj ekonomike"» ot 30 maya 2013 goda № 577
3. Kovalenko E.V., Tyagunov M.G. Hybrid cogeneration power complexes in insulated energetic systems. *Alternative Energy and Ecology (ISJAEE)*. 2015;(10-11):167-177. <https://doi.org/10.15518/isjaee.2015.10-11.015>

4. Vas'kov A.G., Kovalenko E.V., Tyagunov M.G., Sharapov S.A. Ispol'zovanie gibridnyh energokompleksov na osnove vozobnovlyaemyh istochnikov ener-gii v raspredelennoy energetike // Energetik. 2014. № 2. S. 25-27.

5. Martynov A.V. Decentralizovannye sistemy teplosnabzheniya // Novosti teplosnabzheniya. 2006. № 7. S. 24-27.

6. Government Resolution "On approval of the Concept for the development of the fuel and energy complex of the Republic of Kazakhstan for 2023-2029" dated June 28, 2014 No. 724.

7. .Otchet ministra energetiki Respubliki Kazahstan <https://primeminister.kz/ru/news/minenergo-razrabotal-plan-meropriyatiy-po-razvitiyu-elektroenergeticheskoy-otrasli-budut-vvedeny-26-gvt-novykh-generiruyushchikh-moshchnostey-26978>

8. Normy MAGATE po bezopasnosti [Elektron.resurs] <https://www.emd-international.com/windpro/windpro-modules/4-0-features/>

9. [https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg\\_tools/en/](https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/) [Электрон.ресурс]

10. <https://stat.gov.kz/ru/>[Электрон.ресурс]

11. <https://www.emd-international.com/windpro/windpro-modules/4-0-features/>

12. Ilyushin P.V. Povyshenie nadezhnosti funkcionirovaniya raspredelitel'nyh elektricheskikh setej za schet effektivnogo primeneniya sistem nakopleniya elektroenergii// Elektroenergiya. Peredacha i raspredelenie.- 2022-№6 (75) - S. 64-74.

#### **Сведения об авторах:**

**Аусенов К.Ж.** – ведущий инженер ТОО «Казакстанские атомные электрические станции».

**Жантикин Т.М.** – кандидат физико-математических наук, генеральный директор ТОО «Казакстанские атомные электрические станции».

**Жанбирбаев А.А.** – ведущий инженер ТОО «Казакстанские атомные электрические станции».

**Карджаубаев Н.А.** – кандидат технических наук, инженер АО «Казакстанская компания по управлению электрическими сетями».

**Мукушева М.К.** – автор для корреспонденции, доктор технических наук, профессор, директор отделения РГП «Национальный ядерный центр РК» МЭ РК,

<https://orcid.org/0009-0006-8584-5978>

**Окасов Р.К.** – заместитель генерального директора ТОО «Казакстанские атомные электрические станции».

**Аусенов Қ.Ж.** – «Қазақстан атом электр станциялары» ЖШС жетекші инженері

**Жантикин Т.М.** – физика-математика ғылымдарының кандидаты, «Қазақстан атом электр станциялары» ЖШС бас директоры

**Жанбірбаев А.А.** – «Қазақстан атом электр станциялары» ЖШС жетекші инженері

**Қарджаубаев Н.А.** – т.ғ.к., «Қазақстан электр желілерін басқару компаниясы» АҚ инженері

**Мұқышева М.Қ.** – хат авторы, т.ғ.д., профессор, Қазақстан Республикасы Энергетика министрлігінің «Қазақстан Республикасының Ұлттық ядролық орталығы» РМК департаментінің директоры,

<https://orcid.org/0009-0006-8584-5978>



**Оқасов Р.Қ.** – «Қазақстан ядролық электр станциялары» ЖШС бас директорының орынбасары

**Ausenov K.Zh.** – leading engineer of Kazakhstan Nuclear Power Plants LLP

**Zhantikin T.M.** – candidate of physical and mathematical sciences, general director of Kazakhstan Nuclear Power Plants LLP

**Zhanbirbayev A.A.** – leading engineer of Kazakhstan Nuclear Power Plants LLP

**Kardzhaubayev N.A.** – candidate of technical sciences, engineer of Kazakhstan Electricity Grid Management Company JSC

**Mukusheva M.K.** – corresponding author, doctor of technical sciences, professor, director of the department of the RSE National Nuclear Center of the Republic of Kazakhstan of the Ministry of Energy of the Republic of Kazakhstan,

**Okasov R.K.** – deputy general director of Kazakhstan Nuclear Power Plants LLP



Copyright: © 2024 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC) license (<https://creativecommons.org/licenses>)