

АТОМНЫЕ СТАНЦИИ МАЛОЙ МОЩНОСТИ: ТЕХНИЧЕСКИЙ УРОВЕНЬ И ПЕРСПЕКТИВЫ КОММЕРЦИАЛИЗАЦИИ (ОБЗОР)¹

© 2024 г. В. О. Киндра^a, *, И. А. Максимов^a, И. И. Комаров^a, С. К. Осипов^a, О. В. Злывко^a

^aНациональный исследовательский университет “Московский энергетический институт”,
Красноказарменная ул., д. 14, Москва, 111250 Россия

*e-mail: kindra.vladimir@yandex.ru

Поступила в редакцию 06.09.2023 г.

После доработки 03.11.2023 г.

Принята к публикации 29.11.2023 г.

Активное освоение Арктики и Северного морского пути определяет важность опережающего развития систем энергоснабжения удаленных регионов. Ключевым компонентом изолированных энергосистем являются источники энергии малой мощности. Высокая стоимость ископаемого топлива в удаленных регионах наряду с ужесточением экологических норм выводит на первый план задачу внедрения углеродно-нейтральных технологий генерации энергии. Перспективными энергоустановками, производительность которых мало зависит от погодных условий, а эксплуатация не сопряжена с образованием парниковых газов, являются атомные станции малой мощности. В настоящее время в некоторых странах ведутся разработка и внедрение новых типов реакторных установок, электрическая мощность которых не превышает 300 МВт: по данным МАГАТЭ существует более 70 различных проектов. Модульность, многофункциональность (помимо электрогенерации, во многих проектах предусмотрено также производство тепловой энергии и водорода), повышенная компактность и меньшие капитальные затраты на строительство по сравнению с традиционными энергоблоками большой мощности обуславливают перспективность создания маломощных реакторных установок. В настоящем обзоре представлен анализ современного состояния проблем проектирования и внедрения таких энергоустановок. Проведена оценка технического уровня отечественных и зарубежных проектов малых модульных реакторов (ММР). Определены перспективные области использования тепловой энергии малых модульных установок с учетом актуальных трендов в энергетике, включая низкоуглеродное и атомно-водородное направления. Изучены возможные схемные решения для производства электроэнергии на базе перспективных циклов, в том числе с применением нетрадиционных рабочих тел. Рассмотрен потенциал коммерциализации проектов атомных станций малой мощности, вопрос успешной бизнес-реализации энергоустановок такого типа остается открытым.

Ключевые слова: атомные станции малой мощности, малые модульные реакторы, автономность, маневренность, тепловые схемы, водородная энергетика, энергоэффективность, низкоуглеродная энергетика

DOI: 10.56304/S0040363624040027

Освоение территорий Дальнего Востока и Арктики — одна из приоритетных целей государственной политики России на ближайшие десятилетия. В “Стратегии развития Арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности на период до 2035 года”, утвержденной указом Президента № 645 от 26.10.2020 [1], сформулированы приоритетные задачи комплексного освоения и использования ресурсов Арктической зоны и Дальневосточного региона, экономического роста этих территорий

и обеспечения их экологической безопасности. Осуществление многих промышленных проектов в отдаленных и климатически сложных районах тормозится из-за отсутствия необходимой инфраструктуры, недостаточного энергообеспечения технологически изолированных энергосистем, не имеющих подключения к Единой энергетической системе России.

Перспективным направлением формирования энергетической инфраструктуры территорий Дальнего Востока и Арктики является реализация проектов атомных станций малой мощности (АСММ) [2]. Строительство традиционных энергоблоков требует значительных капиталовложений, расходы на транспорт энергетических ре-

¹ Исследование выполнено в НИУ МЭИ при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 23-79-10235).
<https://rscf.ru/project/23-79-10235/>

сурсов предельно высоки, поэтому разработка эффективных автономных энергоустановок становится одной из ключевых задач современности. В Перечне инициатив социально-экономического развития России до 2030 г. “Новая атомная энергетика, в том числе малые атомные реакторы для удаленных территорий” [3] подчеркивается важная роль АСММ для освоения отдаленных регионов. Реализацией этих инициатив занимается Госкорпорация “Росатом”.

Атомные станции малой мощности способны обеспечить стабильное и безуглеродное энергообеспечение потребителей, при этом низкая периодичность перегрузки топлива (например, для реакторов типа РИТМ-200Н не чаще одного раза в 5 лет) позволяет достичь высокой автономности работы [4]. На основе маломощных энергоблоков может осуществляться не только выработка электроэнергии, но и централизованное теплоснабжение городов и предприятий, опреснение морской воды, производство водорода, что в совокупности позволило бы удовлетворить широкий спектр потребностей удаленных регионов [5].

Работа АСММ базируется на использовании малых модульных реакторов (Small Modular Reactor – SMR), которые характеризуются сравнительно небольшой мощностью [обычно до 300 МВт (эл.)]. В конструкции этих реакторов заложены модульные решения, позволяющие наращивать мощность, при этом энергоустановки могут быть размещены на небольшой площади без развитой инфраструктуры. Такие реакторы могут быть изготовлены и собраны непосредственно на заводе и доставлены к месту эксплуатации в готовом виде, что сокращает затраты на возведение новых энергоблоков на удаленных территориях [6].

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПРОЕКТОВ АСММ

Россия является одним из мировых лидеров по количеству проводимых НИОКР и реализуемых проектов в сфере создания и внедрения АСММ. Разработкой энергоустановок малой мощности занимаются АО “ОКБМ Африкантов”, АО НИКИЭТ, НИЦ “Курчатовский институт”. В мае 2020 г. состоялся ввод в эксплуатацию единственной в мире плавучей атомной теплоэлектростанции (ПАТЭС) “Академик Ломоносов” с реакторными установками КЛТ-40С. Максимальная электрическая мощность станции составляет 70 МВт, тепловая мощность – до 169 МВт, энергоблок обеспечивает электроснабжение изолированной сети Чаун-Билибинского узла Чукотского автономного округа и теплоснабжение г. Певек. Реакторы типа КЛТ-40С являются модифицированной версией судовых водо-водяных энергоустановок для атомных ледоколов и лихтеровозов,

на базе этих же энергоблоков созданы реакторы типа РИТМ. Госкорпорация “Росатом” реализует проект наземной АСММ мощностью 106 МВт в Усть-Янском районе Якутии с использованием реакторных установок РИТМ-200Н. Пуск этой станции запланирован на 2027 г.

Исследования в этой сфере ведутся и за рубежом: в США (Westinghouse, General Atomic), Китае (CNNC, Tsinghua University), Кореи (KAERI), Великобритании (Rolls-Royce) и других странах.

В Китае с 2003 г. эксплуатируется разработанный в университете Цинхуа газоохлаждаемый реактор HTR-10 тепловой мощностью 10 МВт [7]. На основе конструкции данного реактора впоследствии был создан гелиевый реактор HTR-PM тепловой мощностью 250 МВт. Два реактора этого типа функционируют в составе единого энергоблока на АЭС “Шидаовань” с 2021 г. [8]. В том же году началось строительство демонстрационного водоохлаждаемого модульного реактора АСР100 на АЭС “Чанцзян”, электрическая мощность которого составляет 125 МВт. Данная реакторная установка была разработана на основе более крупного реактора АСР1000 [9].

В Японии в 1998 г. был запущен исследовательский высокотемпературный газоохлаждаемый реактор HTTR тепловой мощностью 30 МВт. Температура гелиевого теплоносителя на выходе из активной зоны в этом энергоблоке может достигать 950°C. В 2011 г. реактор был выведен из эксплуатации для проведения плановых проверок после аварии на АЭС “Фукусима”, в июле 2021 г. он возобновил свою работу [10]. Японское агентство по атомной энергии совместно с Mitsubishi Heavy Industries планируют создание демонстрационного проекта по производству водорода на базе высокотемпературного реактора [11].

С 2014 г. в стадии строительства находится разработанный аргентинскими специалистами атомный энергоблок с ММР CAREM-25 (Central Argentina de Elementos Modulares). Тепловая мощность демонстрационного реактора будет составлять 100 МВт, а температура водного теплоносителя достигнет 326°C [12].

В начале 2023 г. Комиссия по ядерному регулированию США лицензировала проект ММР от компании NuScale. Водоохлаждаемый реактор VOYGR SMR тепловой мощностью 250 МВт разрабатывается в рамках проекта безуглеродной энергетики (Carbon Free Power Project – CFPP). Атомная электростанция мощностью 462 МВт (эл.) с шестью малыми модульными реакторами от NuScale планировалась к возведению на базе национальной лаборатории в Айдахо, однако в ноябре 2023 г. проект был отменен [13].

Несмотря на большое количество разрабатываемых проектов ММР, технологии малой атомной энергетики не получили широкого распро-

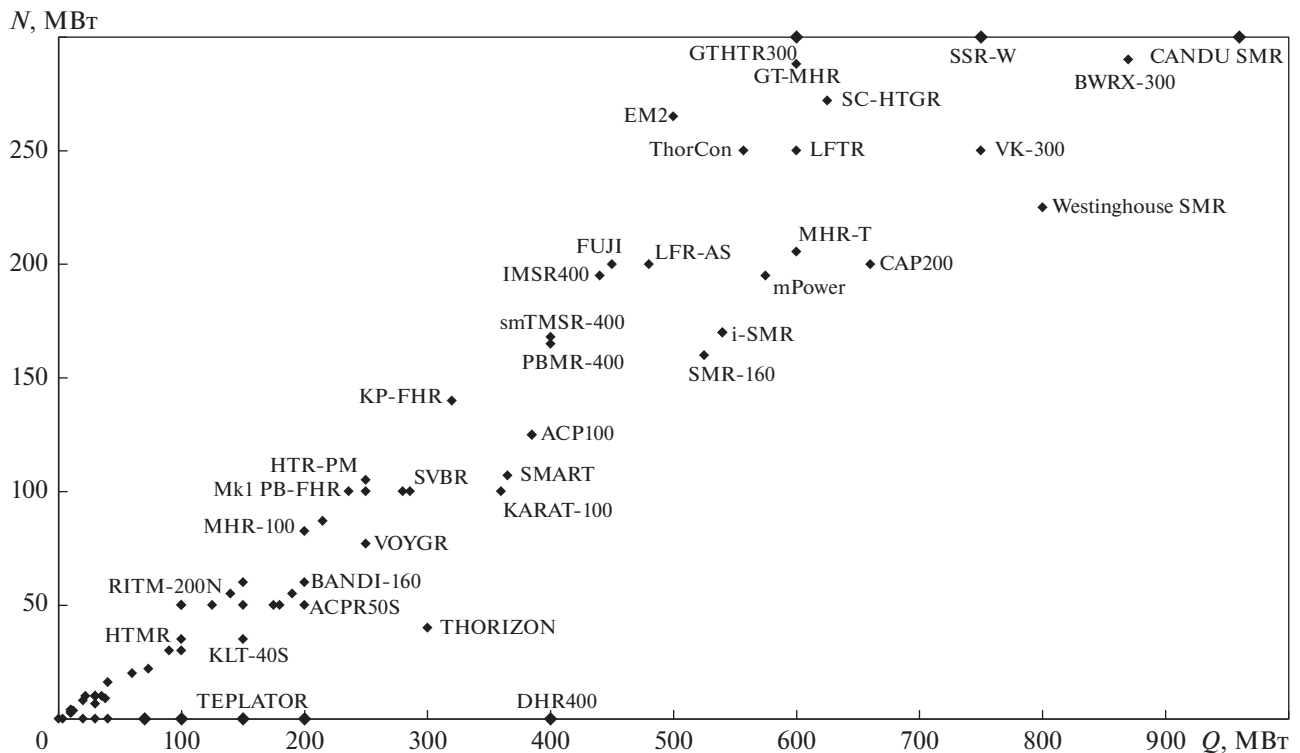


Рис. 1. Тепловая Q и электрическая N мощность проектируемых малых модульных реакторов

странения. Вызвано это как усилением мирового тренда на отказ от атомной энергетики и сокращение числа атомных станций, так и высокой стоимостью реализации проектов: большинство существующих разработок ММР частично или полностью субсидируются государством. Для эффективного коммерческого внедрения проектов АСММ необходимо решение ряда актуальных научно-технических вопросов. Большие удельные капиталовложения в единичную мощность АСММ являются следствием высокой себестоимости отпуска электрической энергии и, таким образом, низкой конкурентоспособности технологии при сопоставлении с традиционными способами энергообеспечения. При разработке конструкторских и схемных решений для малых модульных реакторов одним из ключевых критериев качества проекта становится конечная себестоимость отпуска электроэнергии.

ТЕХНИЧЕСКИЙ УРОВЕНЬ МАЛЫХ МОДУЛЬНЫХ РЕАКТОРОВ

В настоящее время в мире ведутся работы по более чем 70 проектам малых модульных реакторов различной конструкции [14, 15]. Такое количество обусловлено несколькими факторами: во-первых, развитие направления АСММ заложено в стратегиях многих стран; во-вторых, существует множество вариаций конструкторских решений

реакторов; в-третьих, рассматриваются разные области применения маломощных энергоустановок.

Мощность малых модульных реакторов варьируется в широком диапазоне: от 100 кВт (эл.) (микрореактор MARVEL) до 300 МВт (эл.) (CANDU SMR) (рис. 1). Разрабатываются также проекты модульных реакторных установок мощностью до 450 МВт (эл.), например, SMR (Rolls-Roys), LFR, IMR (Westinghouse). Существующие проекты охватывают широкий спектр разных типов реакторов:

- с водным теплоносителем под давлением (PWR) и кипящие реакторы (BWR);

- высокотемпературные газоохлаждаемые реакторы (ВТГР/HTGR) с гелиевым теплоносителем;

- на быстрых нейтронах с жидкометаллическим теплоносителем (LMFR);

- на быстрых нейтронах с теплоносителем на основе расплавов солей (MSR).

Тип модульного реактора во многом определяет уровень максимальной рабочей температуры теплоносителя и, как следствие, энергетическую эффективность реактора. На рис. 2 приведены данные по температуре теплоносителя на выходе из активной зоны для проектов малых модульных реакторов разных типов. Значения варьируются в диапазоне от 98 (DHR400) до 345°C (IMR). Осредненное значение температуры водного теплоносителя на выходе из активной зоны по суще-

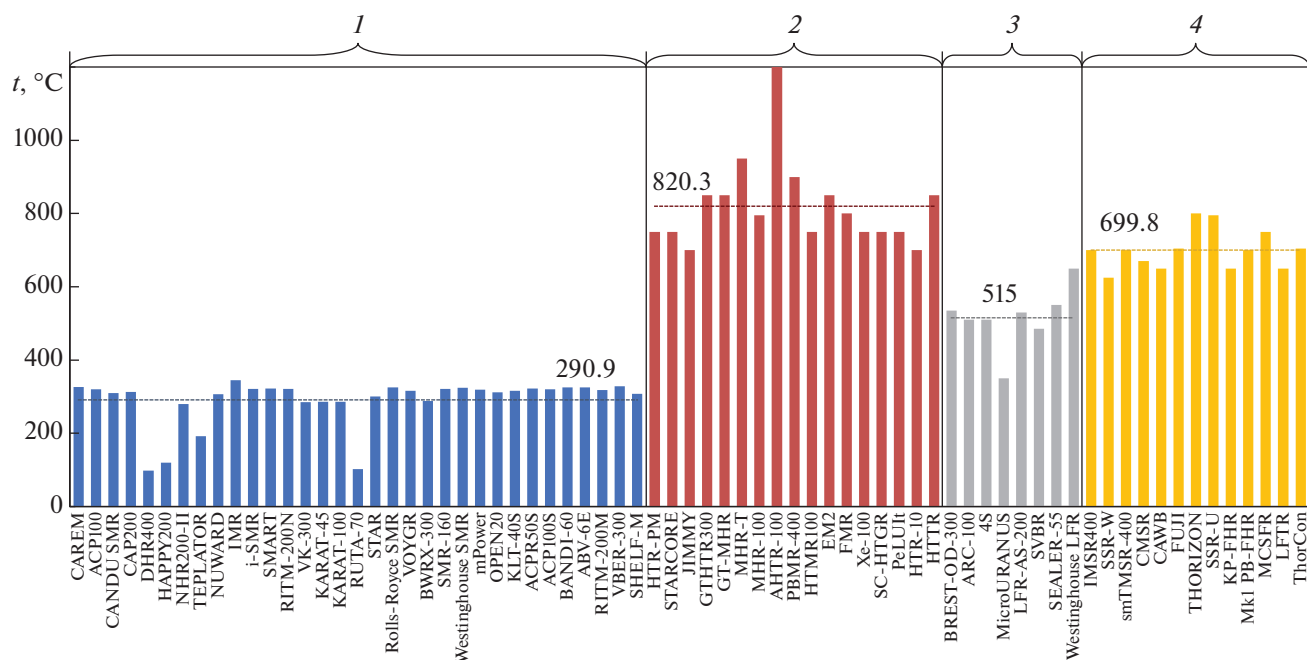


Рис. 2. Рабочая температура t малых модульных реакторов различного типа.
Реакторы: 1 – водоохлаждаемые; 2 – газоохлаждаемые; 3 – жидкометаллические; 4 – жидкосолевые

ствующим проектам составляет 291°C . Реакторы DHR400, HAPPY200, TEPLATOR и РУТА-70 предназначены для централизованного теплоснабжения, поэтому работают при невысоких температурах и давлении.

В реакторах с жидкометаллическим теплоносителем температуры на выходе из активной зоны выше, чем в реакторах с водным теплоносителем (среднее значение по существующим проектам составляет 515°C), что позволяет обеспечить энергетическую эффективность термодинамического цикла. В малых модульных жидкосолевых реакторах температуры могут достигать 700°C и даже 800°C .

Наиболее высокие температуры получают в реакторах типа ВТГР с гелиевым теплоносителем – среднее значение по существующим проектам составляет 820°C , но может приближаться и к 950°C (MHR-T). В южноафриканском проекте АНТР-100 анонсируется предельная температура гелия 1200°C .

Уровень температур в реакторе во многом определяет эффективность производства электрической энергии (рис. 3). Электрический КПД нетто энергоблоков с водоохлаждаемыми модульными реакторами варьируется в диапазоне от 25 до 35%, жидкометаллических – от 33 до 43%, жидкосолевых – от 40 до 45%, а газоохлаждаемых – от 35 до 53%. Большой разброс по эффективности обусловлен различиями схемных решений для преобразования энергии в силовом цикле.

Многие исследования направлены на разработку термодинамически эффективных способов производства электроэнергии на базе ММР.

СХЕМНЫЕ РЕШЕНИЯ ДЛЯ ЭНЕРГОУСТАНОВОК С МАЛЫМИ МОДУЛЬНЫМИ РЕАКТОРАМИ

Генерация электрической энергии является одним из основных назначений большинства проектируемых малых модульных реакторов. Параметры процесса преобразования тепловой энергии деления ядерного топлива в электроэнергию зависят от схемного решения для установки, в которой осуществляется термодинамический цикл, выбор схемы определяет тип реактора и его рабочие характеристики.

В водоохлаждаемых малых модульных реакторах, как и в их традиционных аналогах большой мощности, тепловая энергия преобразуется в электрическую, как правило, в традиционных пароводяных циклах Ренкина. В ММР типа PWR парогенерирующая часть может быть выполнена как отдельно от модуля, так и встроена непосредственно в модуль реактора (например, реактор CAREM-25), что упрощает транспортировку и сборку установки. Как и в традиционных атомных энергоблоках с PWR, паросиловая часть станций с ММР работает без промежуточного перегрева теплоносителя. Компонировку паротурбинного энергоблока определяют мощность реактора, его параметры и наличие отборов, как

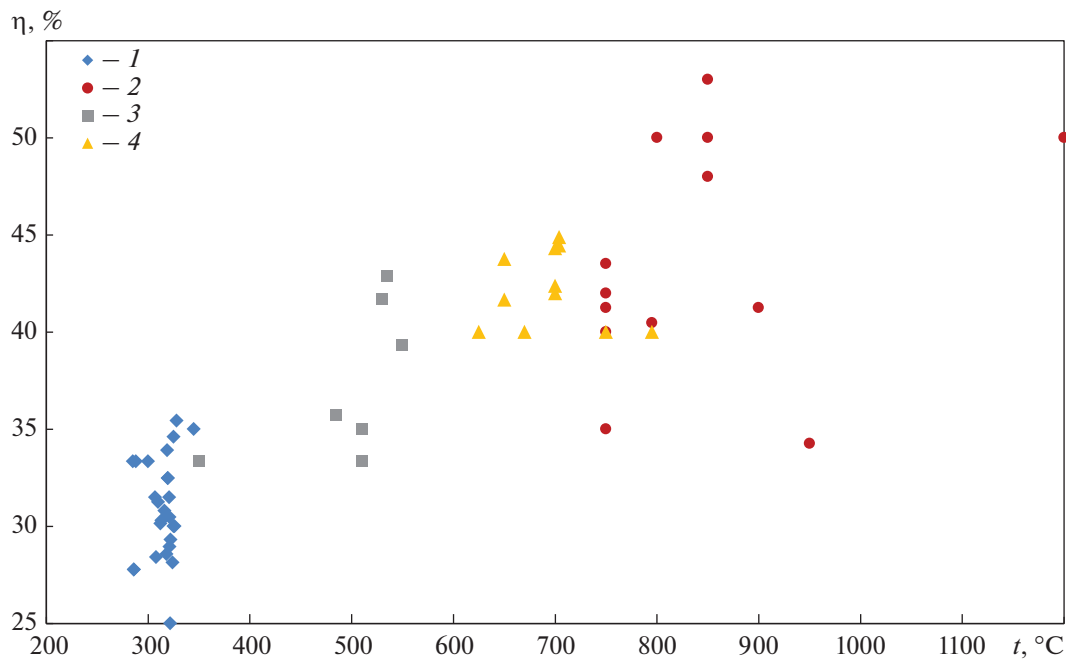


Рис. 3. Уровень КПД производства электроэнергии η с помощью малых модульных реакторов. Реакторы: 1 – водоохлаждаемые; 2 – газоохлаждаемые, 3 – жидкометаллические, 4 – жидкосолевые

теплофикационных, так и для технологических нужд. Например, на ПАТЭС “Академик Ломоносов” с двумя реакторами КЛТ-40С установлены две паротурбинные установки ТК-35/38-3.4с с теплофикационными отборами (рис. 4).

Отдельно следует отметить возможность генерации электроэнергии напрямую с помощью термоэлектрических преобразователей [16]. В Курчатовском институте успешно работает демонстрационный прототип реактора “Елена” теплофикационной мощностью около 3 МВт и электрической 100 кВт. Использование термоэлектрического генератора позволяет сократить количество единиц основного силового оборудования и обеспечить автономность его работы без привлечения обслуживающего персонала.

Для высокоэффективного производства электроэнергии на базе ММР могут использоваться разные виды теплоносителей. Так, в [17] рассматривается вопрос применения октафторпропана в качестве теплоносителя для АСММ с жидкометаллическим реактором. Расчетный КПД превышает 50% при начальной температуре цикла с регенерацией 650°C. При этом массогабаритные характеристики теплообменных аппаратов в активной зоне существенно уменьшаются.

Для модульных реакторов на жидкометаллическом теплоносителе и расплавах солей в настоящее время обсуждается применение не только традиционных паротурбинных циклов, но и более термодинамически эффективных (при высо-

ких температурах) замкнутых газотурбинных циклов Брайтона (рис. 5) [18, 19]. Например, в существующих проектах чаще всего в качестве теплоносителя в рекомпрессионном цикле для производства электроэнергии используется углекислый газ в сверхкритическом состоянии ($S\text{-CO}_2$). Благодаря тому что критическая температура углекислого газа близка к температуре окружающей среды и составляет 31°C, появляется возможность сжатия рабочего тела в компрессоре цикла вблизи линии насыщения с пониженными энергозатратами. Кроме того, высокая плотность среды позволяет существенно уменьшить габариты турбомашин, что положительно сказывается на компактности и капиталоемкости энергоблока АСММ.

Предполагается, что в проектируемых высокотемпературных газоохлаждаемых реакторах малой мощности в качестве теплоносителя будет использоваться гелий. После нагрева в активной зоне гелий будет совершать работу в интегрированном цикле Брайтона (в некоторых проектах – в цикле с рекуперацией) либо отдавать тепло в паросиловой контур (рис. 6) [20]. Гелий является химически инертным газом и не оказывает влияния на баланс нейтронов, а также не вступает в химическую реакцию с материалами реакторной части. Так как в цикле Брайтона температура теплоносителя в контуре остается довольно высокой, может быть реализована надстройка дополнительного пароводяного контура к холодному источнику гелиевого контура [21, 22]. Это позволит значитель-

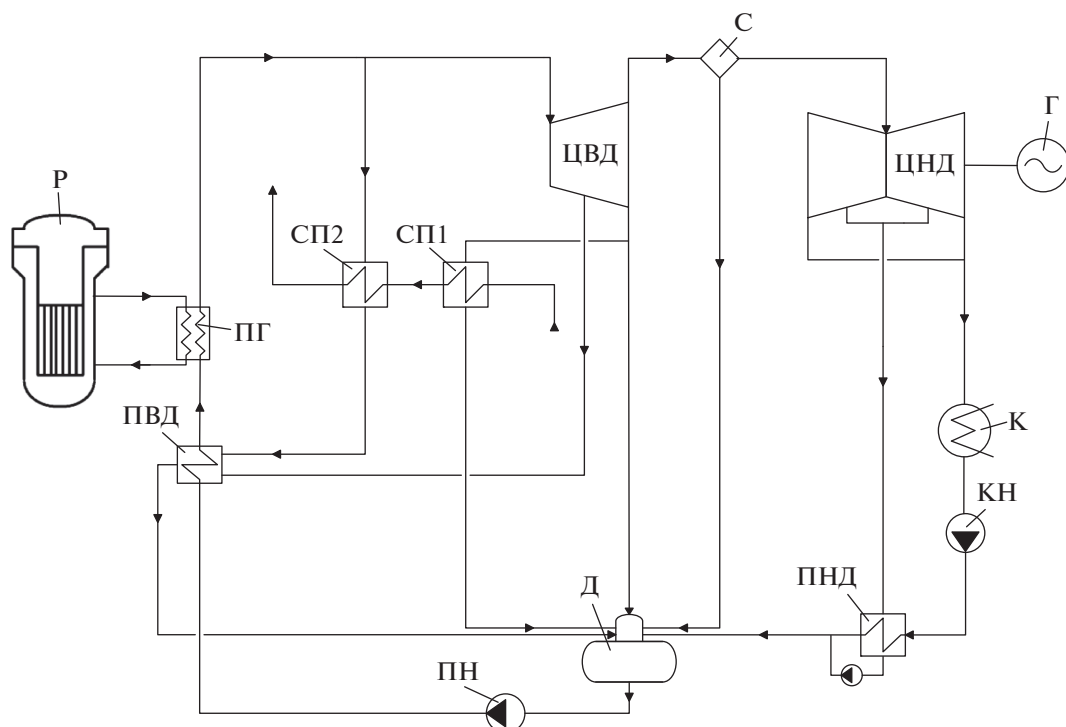


Рис. 4. Упрощенная тепловая схема энергоблока с реактором КЛТ-40С.

Р – реактор; ПГ – парогенератор; ПВД, ПНД – подогреватель высокого и низкого давления; ЦВД, ЦНД – цилиндр высокого и низкого давления; С – сепаратор; СП1, СП2 – сетевые подогреватели; К – конденсатор; Г – генератор; Д – деаэратор; КН и ПН – конденсационный и питательный насосы

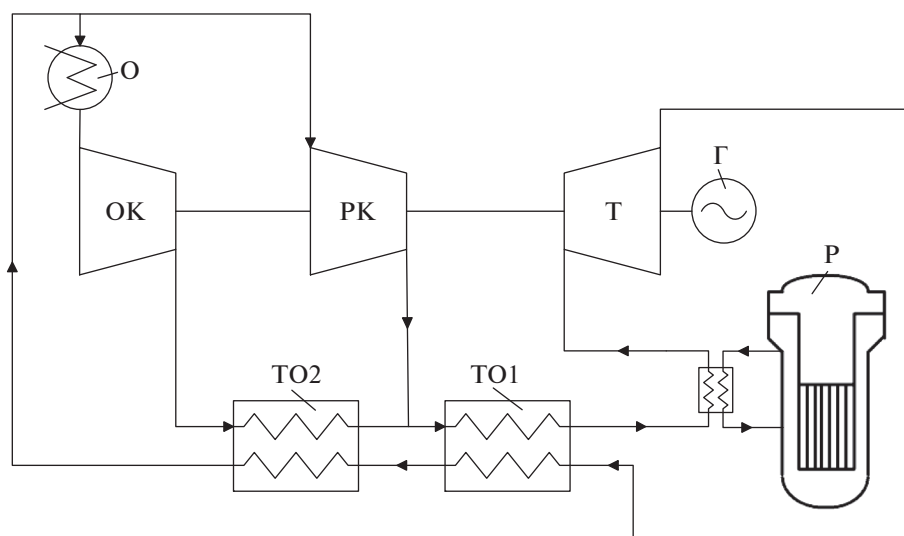


Рис. 5. Тепловая схема энергоблока с рекомпрессионным циклом Брайтона.

О – охладитель; ОК и РК – основной и рекомпрессионный компрессоры; Т – турбина; ТО1 и ТО2 – рекуперативные теплообменники

но повысить эффективность генерации электроэнергии или использовать высокотемпературное тепло для различных технологических процессов.

Широкий диапазон рабочих температур теплоносителя в реакторном контуре дает возможность разнообразить схемные решения для производства

электроэнергии на базе АСММ. Традиционные паротурбинные установки не всегда могут обеспечить наибольшую эффективность термодинамического цикла при выработке электроэнергии, выбор схем зависит как от типа реактора, так и от начальных параметров цикла.

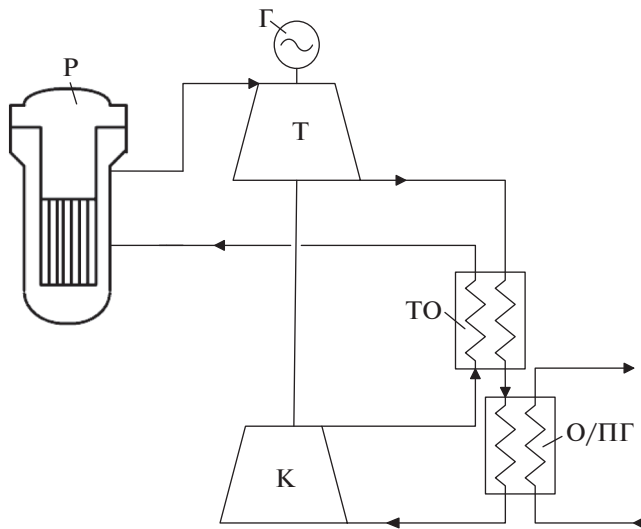


Рис. 6. Схема высокотемпературного газоохлаждаемого реактора с интегрированным гелиевым циклом Брайтона

На рис. 7 представлены расчетные зависимости КПД от максимальной температуры в цикле для различных тепловых схем, используемых для производства электроэнергии. При температурах до 500°C применение традиционных пароводяных циклов Ренкина для АЭС является термодинамически эффективным и обоснованным решением, однако при более высоких начальных параметрах для атомных энергоблоков эффективность сверхкритических углекислотных циклов может превышать показатели паросилового энергоблока [23]. Теме выбора схемных решений для проектов жидкометаллических и жидкосолевых ММР посвящены работы [24, 25].

Для газоохлаждаемых реакторов с гелиевым теплоносителем использование циклов S-CO_2 ограничено конструктивным исполнением реакторных установок и свойствами углекислотного теплоносителя. Применение углекислого газа в качестве теплоносителя реакторного контура на практике не реализуемо, организация цикла Брайтона возможна через промежуточный углекисотно-гелиевый теплообменник, который из-за низкого уровня конвективной теплоотдачи от обоих газовых теплоносителей будет иметь большие габариты и значительную массу [26]. Термодинамическая эффективность гелиевого цикла с регенерацией сопоставима с таковой углекислотных и пароводяных схем, однако благодаря высоким температурам появляется возможность получить дополнительный прирост мощности при надстройке холодного источника паросилового контура. Однако такая схема может быть реализована только при достаточно высокой начальной температуре гелиевого теплоносителя в I контуре.

Эффективность термодинамического цикла ММР конкретного типа при определенном уровне температур определяется выбором тех или иных схемных решений, однако КПД может быть повышен путем сокращения затрат на собственные нужды и снижения потерь энергии в ключевых элементах энергоблока. Это требует новых конструкторских идей для создания основного оборудования рабочего цикла. Одновременно с этим для каждого типа реактора следует учитывать технико-экономические показатели работы, которые также зависят от способа трансформации энергии. Таким образом, остается актуальным вопрос разработки новых энергетически и экономически эффективных схем для АСММ.

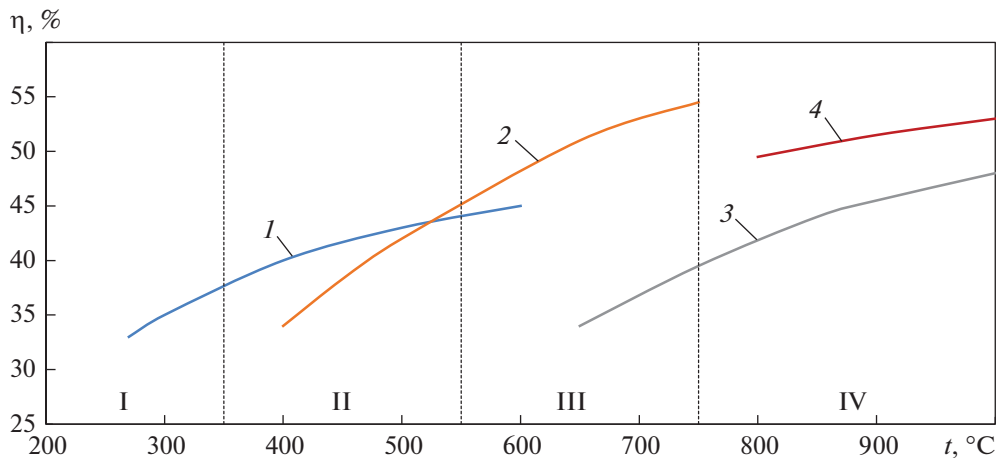


Рис. 7. Зависимость КПД различных циклов ММР от начальной температуры.

ММР: I – водоохлаждаемые; II – жидкометаллические; III – жидкосолевые; IV – гелиевые; 1 – пароводяной цикл Ренкина (без перегрева пара); 2 – рекомпрессионный цикл Брайтона с S-CO_2 ; 3 – гелиевый цикл Брайтона с регенерацией тепла; 4 – гелиевый цикл Брайтона с надстроенным пароводяным циклом Ренкина

Несмотря на высокий уровень проработанности темы термодинамической эффективности тепловых схем для малых модульных реакторов, регулярно появляются публикации, в которых предлагаются новые схемные решения для повышения КПД циклов. Так, в [27, 28] рассматривается вопрос модернизации схем циклов Брайтона с $S\text{-CO}_2$ для реакторов GT-MHR, HTR путем надстройки дополнительных контуров органического цикла Ренкина и полезного использования тепла, отработавшего в газовой турбине теплоносителя.

На сегодняшний день отсутствуют общие рекомендации по выбору структуры, параметров тепловых схем и вида рабочего тела для АСММ с различными реакторами. Ввиду широкого диапазона возможных начальных температур (от 250 до 900°C), традиционные паросиловые циклы могут оказаться менее термодинамически и экономически эффективными по сравнению с циклами на альтернативных рабочих телах.

Таким образом, повысить конкурентоспособность малых модульных реакторов можно не только путем разработки новых энергоустановок повышенной компактности, но и посредством более эффективного использования генерируемой тепловой энергии. Кроме того, повысить энергетическую и экономическую эффективность АСММ можно, если производить дополнительный продукт (например, водород), обеспечивая тем самым синергетический эффект [29, 30].

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ АТОМНЫХ СТАНЦИЙ МАЛОЙ МОЩНОСТИ

Как уже было отмечено ранее, проекты малых модульных реакторов разрабатываются с учетом возможности варьировать области их примене-

ния. Потенциал использования энергоустановки определяется уровнем рабочих параметров, в первую очередь температурой теплоносителя и выдаваемой мощностью, которые необходимы промышленным предприятиям и другим потребителям. Перспективными направлениями применения малых модульных реакторов, помимо традиционного использования на морском транспорте, являются:

- производство электрической энергии;
- теплоснабжение промышленных предприятий и жилых районов;
- опреснение морской воды;
- производство водорода (электролиз, конверсия метана, термохимические циклы).

Теоретически использовать высокотемпературное тепло, генерируемое на АСММ, можно в различных технологических процессах, в том числе, наряду с вышеупомянутыми, в нефтяной и химической промышленности [31, 32]. Это открывает возможности для развития указанных отраслей в удаленных регионах, не имеющих развитой инфраструктуры. Уровень температуры теплоносителя, как было отмечено ранее, определяется типом малого модульного реактора, с переходом на высокотемпературные установки область их применения расширяется.

Температурный диапазон различных промышленных процессов приведен на рис. 8. Высокотемпературное тепло газоохлаждаемых реакторов в перспективе может быть использовано в термохимических циклах (температура рабочего процесса достигает 1000°C), в конверсии метана (температура до 900°C) и в высокотемпературном электролизе (при температурах до 1000°C) [33]. Водоохлаждаемые реакторы могут применяться для энергообеспечения процессов опреснения воды и в теплоснабжении, где требуемый уровень температур не высок. В процессах нефтеперера-

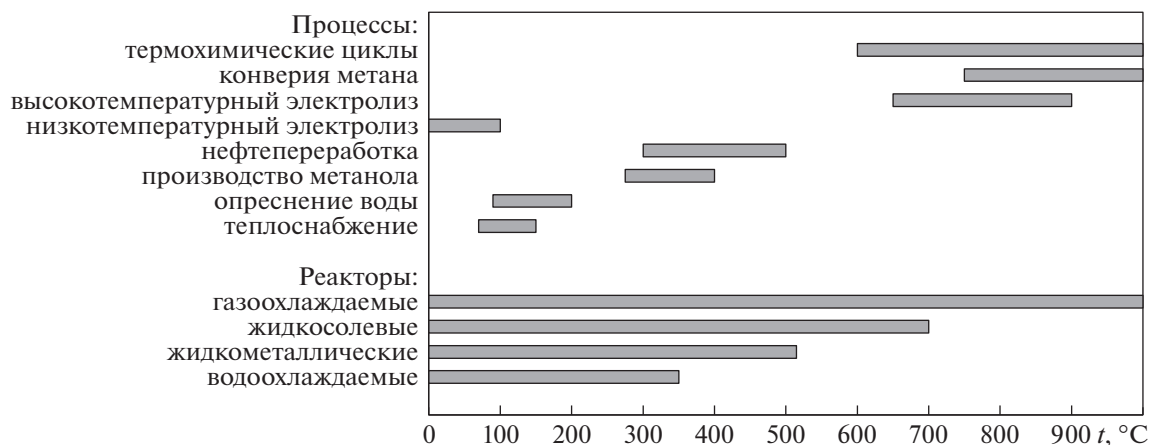


Рис. 8. Диапазоны рабочих температур ММР и различных промышленных процессов

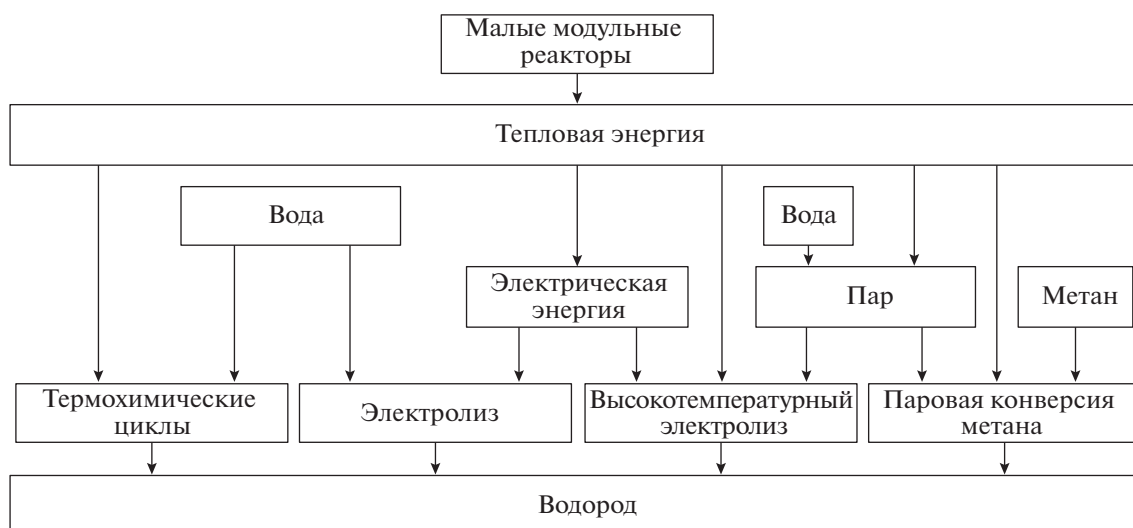


Рис. 9. Способы производства водорода на базе ММР

ботки с необходимостью в высоких температурах перспективным может быть использование жидкосольевых и жидкометаллических реакторов (температура теплоносителя в среднем составляет 700 и 515°C соответственно).

Одним из перспективных направлений использования АЭС, в том числе малой мощности, является производство водорода [34, 35]. Сектор безуглеродной энергетики уверенно растет, в последние десятилетия высокий уровень развития водородных технологий стал значимым показателем технического лидерства развитых стран. Множество научных и коммерческих проектов прорабатывается в этой сфере для традиционных атомных электростанций большой мощности, вместе с тем и в значительном количестве проектов модульных реакторов рассматривается производство водорода в качестве одного из основных продуктов.

Производство водородного топлива на базе атомного энергоблока можно реализовать несколькими способами (рис. 9), которые различаются уровнем рабочих температур технологического процесса и видом потребляемого сырья [36].

Среди всех способов производства водорода электролиз воды является наиболее технически проработанным: пилотные проекты по интеграции электролизных установок с атомными энергоблоками уже реализуются, в том числе и в России. На Кольской АЭС на щелочных электролизерах производится водород, который используется для охлаждения турбогенераторов. В 2022 г. был введен в эксплуатацию новый электролизный блок на базе отечественного оборудования с протонообменными мембранами. К 2025 г. запланирована реализация проекта стендового испытательного комплекса по производству водорода.

Эффективность цепочки преобразования “тепловая энергия — электрическая энергия — водород” сравнительно невысока, если учитывать потери на каждом этапе. Коэффициент полезного действия нетто энергоблоков с ВВЭР-440, эксплуатируемых на Кольской АЭС, достигает 32%, а эффективность современных щелочных электролизеров составляет в среднем не более 70% [37]. Повысить эффективность производства можно путем перехода на высокотемпературные твердооксидные электролизеры, температура процесса в которых превышает 500°C, а обеспечить такие параметры пара можно с использованием тепла жидкометаллических, жидкосольевых и газоохлаждаемых малых модульных реакторов [38]. Энергетическая эффективность такого способа производства водорода выше, чем у низкотемпературного электролиза, однако твердооксидные электролизеры находятся пока на ранней стадии разработки.

Применение высокотемпературного тепла ММР для процесса конверсии природного газа в целях производства водорода может стать перспективным направлением [39, 40]. Россия является одним из ведущих мировых экспортеров природного газа, благодаря внедрению технологий конверсии и мощной атомной отрасли появляется возможность развивать водородную энергетику, в том числе с производством водорода на экспорт. Это позволит обеспечить мировой спрос на экологически чистое безуглеродное топливо, потребность в котором растет на фоне борьбы с глобальным изменением климата и почти повсеместным внедрением углеродного регулирования.

Ведутся работы по использованию высокотемпературных термохимических циклов (таких как серно-йодные и медно-хлорные) для производ-

ства водорода с помощью ядерных энергоустановок [41]. Японское агентство по атомной энергии провело успешные эксперименты по применению серно-йодного цикла на базе высокотемпературного испытательного реактора [42]. В соответствии с соглашением, принятым в рамках МАГАТЭ в отношении мирного использования ядерной энергии, специалисты СЕА (Франция), General Atomics и Sandia National Laboratories (США) совместно разрабатывают установки, работающие по серно-йодному циклу [43].

Опреснение морской воды — важное направление развития технологий, призванных решить проблему обеспечения населения планеты питьевой водой. Энергоемкие технологические процессы, в том числе низкотемпературная многокаскадная перегонка, в удаленных регионах без развитой инфраструктуры могут получать тепло от АСММ. Температура рабочего процесса обычно не превышает 200°C, что позволяет организовать энергообеспечение опреснительных установок с помощью технологических отборов пара в ступенях паротурбинной установки атомного энергоблока.

Другое перспективное направление использования малых модульных реакторов — их интеграция с тепловыми электростанциями, которая дает возможность создавать энергетические комплексы с высоким уровнем энергоэффективности, экологичности и маневренности. В настоящее время ведутся исследования комбинированных газотурбинных энергоблоков с атомными реакторами, в том числе малой мощности.

В Калифорнийском университете изучают возможности применения малого модульного реактора Mk1 PB-FHR с жидкосолевым теплоносителем Li_2BeF_4 на базе парогазового энергоблока [44, 45]. Одной из целей проекта является определение эффективности системы ядерно-воздушного комбинированного цикла с модульными реакторами (рис. 10, а). Принцип работы предлагаемого энергоблока заключается в следующем: жидкосолевой теплоноситель реакторного контура с температурой 700°C подогревает сжатый воздух в модифицированной газотурбинной установке General Electric 7FB. При этом первичный нагрев рабочего тела происходит в воздушно-жидкосолевым теплообменнике, а промежуточный перегрев — во внешней камере сгорания, после чего уходящие газы отдают тепло в котле-утилизаторе для реализации пароводяного цикла. Предполагается, что энергоблок мощностью 100 МВт будет обладать высокой маневренностью, диапазон нагрузки может варьироваться от 100 до 40%, а КПД энергоблока будет достигать 42.5%.

Возможностям объединения атомных и газотурбинных установок посвящены работы отечественных специалистов [46, 47]. Помимо инте-

грации реакторов для нагрева воздуха в ГТУ, альтернативным вариантом является использование уходящих газов для нагрева пароводяного теплоносителя в цикле Ренкина (рис. 10, б). В паросиловой части установки с реактором СВБР-100 со свинцово-висмутовым теплоносителем подогреватели высокого давления могут быть заменены на газоводяные теплообменники, добавление перегрева пара до температуры 560°C позволит повысить КПД нетто энергоблока до 45.39% при использовании двух ГТУ GE 6101FA.

Совмещение ММР и газотурбинных технологий в едином энергоблоке — перспективный вариант создания высокоэффективных атомных энергетических комплексов, имеющих повышенный уровень маневренности (по сравнению с традиционными АЭС) и экологичности благодаря сокращению удельных выбросов вредных веществ в атмосферу.

ПЕРСПЕКТИВЫ ВНЕДРЕНИЯ И КОММЕРЦИАЛИЗАЦИИ АСММ

Как было отмечено ранее, в настоящее время ведется разработка более 70 проектов ММР, несколько маломощных энергоблоков с модульными установками уже эксплуатируются в различных странах, ряд реакторов находится в стадии строительства. Однако большинство этих проектов — исследовательские либо демонстрационные, они частично или полностью финансируются правительствами стран. Широкое применение технологий ММР в условиях рыночных отношений зависит от их коммерциализации, поэтому обеспечение высокой экономической эффективности работы АСММ является актуальной задачей.

Одна из основных проблем, стоящая на пути распространения технологий АСММ, — высокая удельная (на единицу отпускаемой мощности) капиталоемкость строительства станций и, как следствие, большая стоимость отпуска электроэнергии и других продуктов [48]. Удельные капитальные затраты для энергоблоков с ММР могут превышать показатели АЭС с реакторами большой мощности на более чем 50%, однако меньшие затраты на строительство и эффект масштаба производства серии идентичных реакторных установок могут способствовать повышению конкурентоспособности АСММ [49]. При этом, несмотря на использование модульных решений при создании, транспортировке и возведении маломощных реакторов, значительная доля капитальных вложений в энергоблок будет приходиться на системы обеспечения безопасности в процессе его эксплуатации [50, 51]. Сложными и лишь частично проработанными остаются вопросы хранения, транспортировки и переработки отработавшего топлива. Требуется решения про-

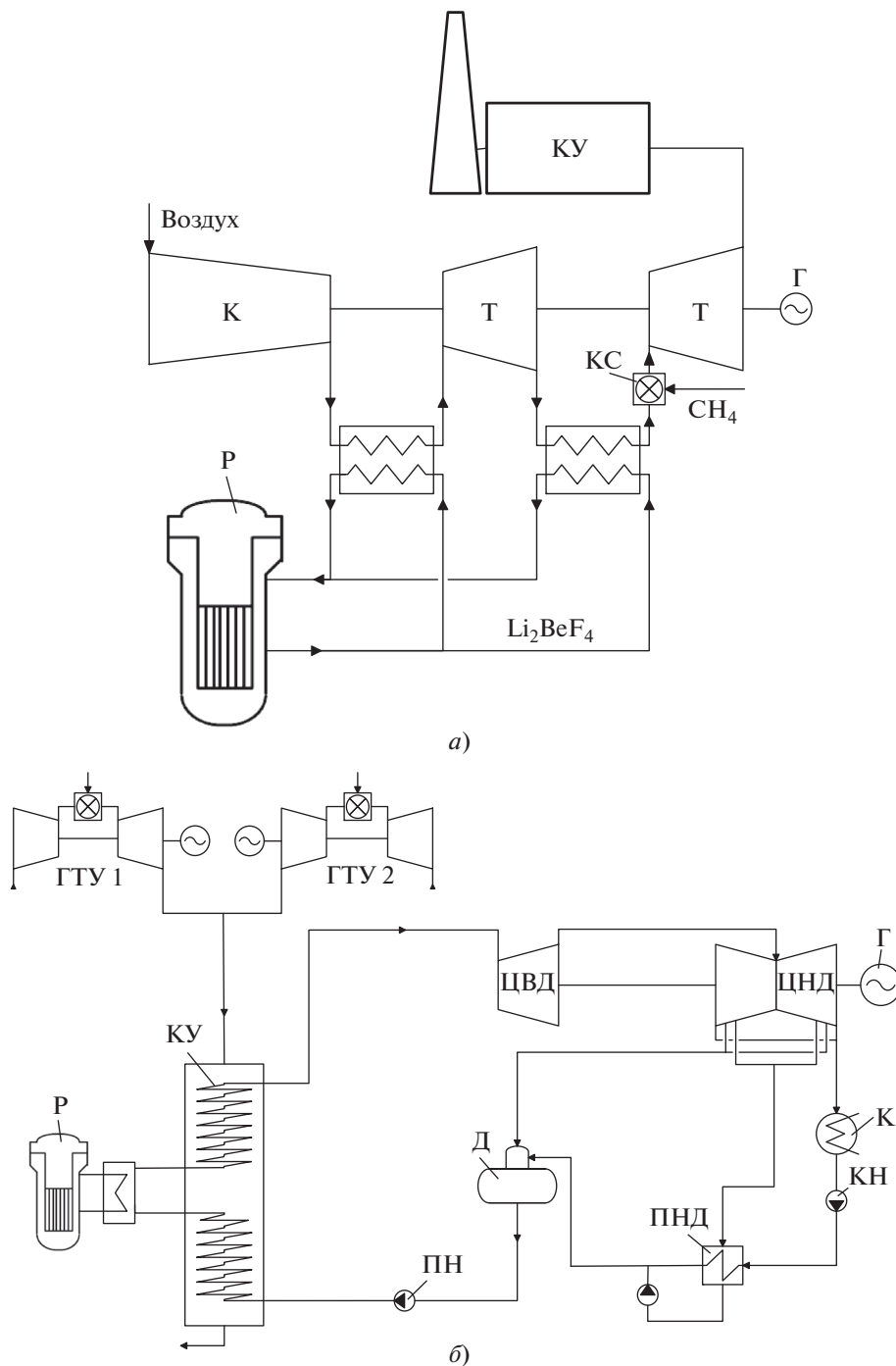


Рис. 10. Схемы интеграции ММР и ТЭС: ядерно-воздушный цикл (а), подогрев питательной воды и перегрев пара в котле-утилизаторе (б).

КС — камера сгорания; КУ — котел-утилизатор

блема лицензирования новых атомных проектов [52, 53]. В США активно разрабатывается не менее пяти проектов ММР, поддерживаемых государственными и частными компаниями, однако этап лицензирования по состоянию на 2023 г. прошел только проект NuScale [54].

Для оценки перспектив реализации проектов АСММ может быть использована нормирован-

ная себестоимость производства электроэнергии (LCOE). На рис. 11 приведены значения LCOE для энергоблоков различного типа, включая АСММ на базе двух реакторов РИТМ-200Н в зависимости от стоимости топлива. От цены на топливо $C_{\text{топл}}$ напрямую зависит конкурентоспособность традиционных ТЭС (как паротурбинных, так и газотурбинных энергоблоков), при

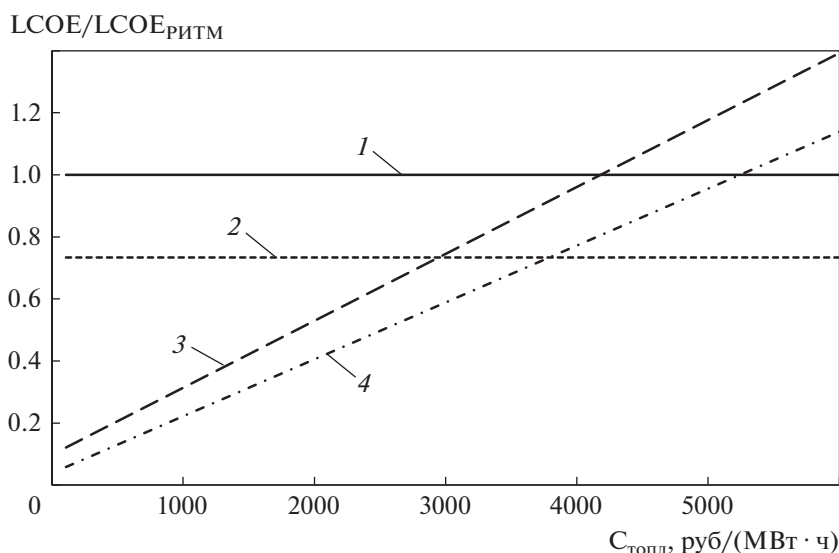


Рис. 11. Нормированная себестоимость электроэнергии, получаемой от различных энергоустановок. 1 — АСММ на базе РИТМ-200Н; 2 — ветроэлектростанция; 3 — ПТУ с установкой К-100-90; 4 — ГТУ SGT-800

этом в стоимость включаются затраты на доставку топлива, которые могут быть весьма значительными для удаленных регионов без развитой транспортной инфраструктуры [55]. В свою очередь, АСММ может автономно снабжать энергией удаленные регионы без подвоза ядерного топлива в течение длительного времени (с периодом перегрузки топлива для существующих проектов не менее 5 лет). С увеличением издержек на углеводородное топливо себестоимость производства электроэнергии на базе традиционных энергоблоков может превысить значения, характерные для АСММ [56].

Себестоимость электроэнергии, вырабатываемой на АСММ с реакторами РИТМ, может составлять 140 дол/(МВт · ч) [57] (в ценах на январь 2020 г.), что выше показателей традиционных ТЭС в диапазоне цен на топливо до 3000 руб/(МВт · ч), а при ценах выше 4800 руб/(МВт · ч) АСММ может конкурировать с газотурбинными энергоблоками малой мощности. Для уверенного выхода на рынки малых мощностей АСММ должны обеспечивать целевой уровень LCOE не выше 90 дол. за 1 МВт · ч [57]. Для коммерциализации проектов необходимо проведение исследований, направленных на сокращение капитальных затрат на оборудование АСММ, снижение его массогабаритных показателей, повышение эффективности отпуска энергии. Так, в [58] было установлено, что значение LCOE у проекта плавучего энергоблока с реактором РИТМ-400М может быть ниже на более чем 14% по сравнению с РИТМ-200С, в том числе благодаря увеличенной в 1.7 раза тепловой мощности.

Альтернативным вариантом энергообеспечения удаленных регионов могла бы стать энергетика на возобновляемых источниках, однако существующие технологии не способны обеспечить стабильное энергоснабжение населения и предприятий удаленных регионов с неравномерным спросом на электроэнергию. Применение ГЭС в арктических условиях сильно ограничено ввиду полного промерзания рек зимой. Климатические особенности затрудняют или полностью исключают эксплуатацию систем преобразования солнечной энергии. Использование ветроэнергетики возможно только совместно с системами аккумуляции, что существенно усложняет инфраструктуру и увеличивает себестоимость отпуска энергии. В локальных энергосистемах удаленных регионов с одним источником электроснабжения плохие погодные условия способны многократно увеличить риск возникновения дефицита мощности. В сравнении с системами на возобновляемых источниках энергии АСММ обладает рядом преимуществ, прежде всего стабильностью и независимостью от изменений погоды.

Таким образом, в удаленных регионах, где отсутствует возможность работы традиционных ТЭС из-за ограничений по поставкам топлива, а реализация энергетических систем на возобновляемых источниках затруднена вследствие технических и экономических проблем, АСММ могут стать единственным возможным средством энергообеспечения. Социально-экономическое развитие регионов Арктики и Восточной Сибири является одной из приоритетных задач для России. Растет потребность строительства на этих территориях новых объектов энергоснабжения граждан

данской и промышленной инфраструктуры. Для эффективного запуска систем АСММ в удаленных регионах могут быть необходимы дополнительные меры их государственной поддержки [59]. В перспективе, в результате реализации все большего числа проектов и разработки новых научно-технических решений, возможно развитие коммерческого сектора проектирования, производства и эксплуатации АСММ для энергообеспечения гражданских зданий и промышленных предприятий.

ВЫВОДЫ

1. Атомные станции малой мощности – перспективное направление развития распределенной энергетики, в особенности для энергообеспечения удаленных регионов без развитой инфраструктуры. Это обусловлено возможностью стабильного безуглеродного энергоснабжения с низкими затратами на доставку топлива. Меньшие, по сравнению с традиционными станциями большой мощности, капиталовложения, требующиеся на возведение атомного энергоблока, делают вполне оправданной реализацию коммерческих проектов энергоснабжения изолированных энергосистем, а генерация высокотемпературного тепла расширяет потенциальную область применения ММР. Во многих проектах уже сегодня предусматривается применение атома не только для генерации электрической и тепловой энергии, но и для производства водорода, обеспечения населения питьевой водой и высокотемпературного теплоснабжения различных химических процессов.

2. Основными препятствиями на пути внедрения технологии являются высокие капитальные вложения в строительство энергоблоков на базе малых модульных реакторов и неконкурентная себестоимость отпуска электроэнергии. Вызвано это, в первую очередь, большими затратами на обеспечение безопасной эксплуатации атомных энергоблоков, значительной стоимостью основного силового оборудования станции, а также недостаточным уровнем его маневренности и энергетической эффективности. Цена отпуска электроэнергии не позволяет АСММ конкурировать с традиционными ТЭС на природном газе. Только в регионах с высокой стоимостью топлива и неразвитой газотранспортной системой возведение маломощных атомных энергоблоков может быть коммерчески оправдано. В настоящее время ММР могут конкурировать с ГТУ только при стоимости электроэнергии свыше 4800 руб/(МВт · ч), а с ПТУ – 3000 руб/(МВт · ч).

3. Повысить конкурентоспособность АСММ можно путем разработки новых схемных решений, обеспечивающих оптимальные технико-экономические показатели работы энергоблока. Достичь необходимого уровня энергетической

эффективности и снизить металлоемкость основного оборудования можно путем перехода на новые виды теплоносителя, а также благодаря оптимизации структуры и параметров тепловых схем. Задача разработки новых схемных и конструкторских решений для атомных энергоблоков на базе реакторов малой мощности остается актуальной.

4. Интеграция ММР и газотурбинных технологий, использование систем аккумулирования энергии позволят улучшить маневренность АСММ и создать для них дополнительные конкурентные преимущества. Выгоды сулит и применение водородных технологий: производство водорода на базе электролизеров, высокотемпературных циклов либо конверсии метана. В этом случае еще одним плюсом в пользу АСММ становится возможность внутреннего потребления водорода для обеспечения работы энергоустановки в условиях изменяющегося спроса на электроэнергию.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Указ** Президента РФ от 26.10.2020 № 645 (ред. от 27.02.2023) “О Стратегии развития Арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности на период до 2035 года”. [Электрон. ресурс.] <http://www.kremlin.ru/acts/bank/45972> (Дата обращения: 05.09.2023.)
2. **An overview** of small nuclear power plants for clean energy production: comparative analysis of distributed generation technologies and future perspectives / N. Rogalev, A. Rogalev, V. Kindra, O. Zlyvko, S. Osipov // *Energies*. 2023. V. 16. No. 13. P. 4899. [Multidisciplinary Digital Publishing Institute.]
3. **Перечень** инициатив социально-экономического развития Российской Федерации до 2030 года. [Электрон. ресурс.] <http://static.government.ru/media/files/jwsYsyJKWGQQAaCSMGrd7q82RQ5xE-Co3.pdf> / (Дата обращения: 05.09.2023.)
4. **Сравнительная** эффективность использования атомных станций малой мощности в локальных энергосистемах на востоке России / Н.И. Воропай, Б.Г. Санеев, И.Ю. Иванова, А.К. Ижбулдин // *Атомные станции малой мощности: новое направление развития энергетики*: сб. Т. 2 / под ред. А.А. Саркисова; ИБРАЭ РАН. М.: Академ-Принт, 2015. С. 59.
5. **Определение** основных направлений развития атомных станций малой мощности / С.Л. Соловьев, Д.Г. Зарюгин, С.Г. Калякин, С.Т. Лескин // *Изв. вузов. Ядерная энергетика*. 2022. № 1. С. 22–34.
6. **Атомные** станции малой мощности: новое направление развития энергетики: сб. Т. 2. / под ред. А.А. Саркисова; ИБРАЭ РАН. М.: Академ-Принт, 2015.
7. **Wu Z., Lin D., Zhong D.** The design features of the HTR-10 // *Nucl. Eng. Des.* 2002. V. 218. No. 1. P. 25–32. [https://doi.org/10.1016/S0029-5493\(02\)00182-6](https://doi.org/10.1016/S0029-5493(02)00182-6)

8. **China's** demonstration HTR-PM reaches full power : New Nuclear – World Nuclear News. [Электрон. ресурс.] <https://world-nuclear-news.org/Articles/China-s-demonstration-HTR-PM-reaches-full-power> (Дата обращения: 05.09.2023.)
9. **China** starts construction of demonstration SMR : New Nuclear – World Nuclear News [Электрон. ресурс.] URL: <https://world-nuclear-news.org/Articles/China-starts-construction-of-demonstration-SMR> (Дата обращения: 01.09.2023.)
10. **Outline** of high temperature engineering test reactor. [Электрон. ресурс.] <https://www.jaea.go.jp/04/o-arai/nhc/en/faq/htr.html> (Дата обращения: 05.09.2023.)
11. **JAEA** and MHI commence demonstration program for hydrogen production using a high temperature engineering test reactor. Project for achieving carbon neutrality. [Электрон. ресурс.] <https://www.mhi.com/news/220427.html> (Дата обращения: 05.09.2023.)
12. **CAREM-25**: A safe innovative small nuclear power plant / C.P. Marcel, D.F. Delmastro, M. Schlamp, O. Calzetta. Sociedad Nuclear Española, 2017.
13. **Penn I., Plumer B.** Nuclear energy project in idaho is canceled // The New York Times. 8.11.2023.
14. **Ingersoll D.T., Carelli M.D.** Handbook of small modular nuclear reactors: 2nd ed. Woodhead Publishing, 2020.
15. **Advances** in small modular reactor technology developments: A supplement to IAEA Advanced Reactors Information System (ARIS). Austria: IAEA, 2022. P. 424.
16. **Pustovalov A.A.** Nuclear thermoelectric power units in Russia, USA and European space agency research programs // Proc. of the XVI Intern. Conf. on Thermoelectrics – ICT'97. (Cat. No. 97TH8291). Dresden, Germany, 26–29 Aug. 1997. P. 559–562.
17. **Сухих А.А., Антаненкова И.С., Тхинь Ч.К.** Анализ теплотехнических характеристик теплосилового контура АЭС малой мощности на неводных рабочих веществах // Теплоэнергетика. 2022. № 11. С. 16–27. <https://doi.org/10.56304/S004036362211008X>
18. **Structural** and parametric optimization of S-CO₂ nuclear power plants / N. Rogalev, A. Rogalev, V. Kindra, I. Komarov, O. Zlyvko // Entropy. 2021. V. 23. No. 8. <https://doi.org/10.3390/e23081079>
19. **A supercritical** CO₂ Brayton cycle for advanced reactor applications / V. Dostál, P. Hejzlar, M.J. Driscoll, N. Todreas // Trans. Am. Nucl. Soc. 2001. V. 85. P. 110.
20. **Herranz L.E., Linares J.I., Moratilla B.Y.** Power cycle assessment of nuclear high temperature gas-cooled reactors // Appl. Therm. Eng. 2009. V. 29. No. 8–9. P. 1759–1765. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2008.08.006>
21. **McDonald C.F.** Power conversion system considerations for a high efficiency small modular nuclear gas turbine combined cycle power plant concept (NGTCC) // Appl. Therm. Eng. 2014. V. 73. No. 1. P. 82–103. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.07.011>
22. **Kim R.L., Rust J.H., Rardin R.R.** Optimization of helium-steam binary cycles for HTGRs // Ann. Nucl. Energy. 1980. V. 7. No 11. P. 611–622. [https://doi.org/10.1016/0306-4549\(80\)90047-X](https://doi.org/10.1016/0306-4549(80)90047-X)
23. **Perspective** of S-CO₂ power cycles / J. Xu, C. Liu, E. Sun, J. Xie, M. Li, Y. Yang, J. Liu // Energy. 2019. V. 186. P. 115831. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.07.161>
24. **A concept** design of supercritical CO₂ cooled SMR operating at isolated microgrid region / S.G. Kim, H. Yu, J. Moon, S. Baik, Y. Kim, Y.H. Jeong, J.I. Lee // Int. J. Energy Res. 2017. V. 41. No. 4. P. 512–525. <https://doi.org/10.1002/er.3633>
25. **Bustos J., Vergara J.A., Correa F.A.** Development of a concept power plant using a small modular reactor coupled with a supercritical CO₂ Brayton cycle for sustainable Antarctic stations // Prog. Nucl. Energy. 2021. V. 132. P. 103606. <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2020.103606>
26. **Chai L., Tassou S.A.** A review of printed circuit heat exchangers for helium and supercritical CO₂ Brayton cycles // Therm. Sci. Eng. Prog. 2020. V. 18. P. 100543. <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2020.100543>
27. **Yari M., Mahmoudi S.M.S.** A thermodynamic study of waste heat recovery from GT-MHR using organic Rankine cycles // Heat Mass Transfer. 2011. V. 47. No. 2. P. 181–196. <https://doi.org/10.1007/s00231-010-0698-z>
28. **Off-design** behavior investigation of the combined supercritical CO₂ and organic Rankine cycle / G. Fan, Y. Du, H. Li, Y. Dai // Energy. 2021. V. 237. P. 121529. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.121529>
29. **Cogeneration**: An option to facilitate load following in small modular reactors / G. Locatelli, A. Fiordaliso, S. Boarin, M.E. Ricotti // Prog. Nucl. Energy. 2017. V. 97. P. 153–161. <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2016.12.012>
30. **Клименко А.В., Агабабов В.С., Борисова П.Н.** Совместная генерация произведенных энергоносителей (обзор) // Науч.-техн. ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. 2019. Т. 25. № 2. С. 6–29. <https://doi.org/10.18721/JEST.25201>
31. **An overview** of sustainable energy development by using cogeneration technology and opportunity for improving process / A.A. Salehi, M. Ghannadi-Maragheh, M. Torab-Mostaedi, R. Torkaman, M. Asadollahzadeh // Int. J. Energy Res. 2021. V. 45. No. 8. P. 11423–11439. <https://doi.org/10.1002/er.5742>
32. **Konarek E., Tedford N.** Small modular nuclear reactors and the opportunity for the petroleum industry // Proc. of the 23rd World Petroleum Congress. Houston, Texas, Dec. 2021.
33. **Высокотемпературный** газоохлаждаемый реактор – энергоисточник для промышленного производства водорода / Ф.М. Митенков, Н.Г. Кодочигов, А.В. Васяев, В.Ф. Головкин, Н.Н. Пономарев-Степной, Н.Е. Кухаркин, А.Я. Столяревский // Атомная энергия. 2004. Т. 97. Вып. 6. С. 432–446.
34. **Load following** of Small Modular Reactors (SMR) by cogeneration of hydrogen: A techno-economic analysis / G. Locatelli, S. Boarin, A. Fiordaliso, M.E. Ricotti // Energy. 2018. V. 148. P. 494–505. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.01.041>

35. **Аминов Р.З., Байрамов А.Н.** Современное состояние и перспективы производства водорода на АЭС // Теплоэнергетика. 2021. № 9. с. 3–13. <https://doi.org/10.1134/S0040363621080014>
36. **Пономарев-Степной Я.Я., Столяревский А.Я.** Атомно-водородная энергетика // Альтернативная энергетика и экология. 2004. № 3. С. 5–10.
37. **Brauns J., Turek T.** Alkaline water electrolysis powered by renewable energy: A review: 2 // Processes. 2020. V. 8. No. 2. P. 248. [Multidisciplinary Digital Publishing Institute.] <https://doi.org/10.3390/pr8020248>
38. **Nian V., Zhong S.** Economic feasibility of flexible energy productions by small modular reactors from the perspective of integrated planning // Prog. Nucl. Energy. 2020. V. 118. P. 103106. <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2019.103106>
39. **Атомный** энерготехнологический комплекс с высокотемпературными газоохлаждаемыми реакторами для масштабного экологически чистого производства водорода из воды и природного газа / Н. Пономарев-Степной, С. Алексеев, В. Петрунин, Н. Кодочигов, Л. Кузнецов, С. Фатеев, Г. Кодочигов // Газовая промышленность. 2018. № 11 (777). С. 94–102.
40. **Макарян И.А., Седов И.В.** Состояние и перспективы развития мировой водородной энергетики // Рос. хим. журн. 2021. Т. 65. № 2. С. 3–21.
41. **Safari F., Dincer I.** A review and comparative evaluation of thermochemical water splitting cycles for hydrogen production // Energy Convers. Manage. 2020. V. 205. P. 112182.
42. **R&D status** in thermochemical water-splitting hydrogen production iodine-sulfur process at JAEA / H. Noguchi, H. Takegami, S. Kasahara, N. Tanaka, Y. Kamiiji, J. Iwatsuki, H. Aita, S. Kubo // Energy Procedia. 2017. V. 131. P. 113–118. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.09.459>
43. **El-Emam R.S., Ozcan H., Zamfirescu C.** Updates on promising thermochemical cycles for clean hydrogen production using nuclear energy // J. Cleaner Prod. 2020. V. 262. P. 121424. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121424>
44. **Design** summary of the mark-I pebble-bed, fluoride salt-cooled, high-temperature reactor commercial power plant / C. Andreades, A.T. Cisneros, J.K. Choi, A.Y.K. Chong, M. Fraton, S. Hong, L.R. Huddar, K.D. Huff, J. Kendrick, D.L. Krumwiede, M.R. Laufer, M. Munk, R.O. Scarlat, N. Zweibau // Nucl. Technol. 2016. V. 195. No. 3. P. 223–238. <https://doi.org/10.13182/NT16-2>
45. **Cisneros A.T.** Pebble bed reactors design optimization methods and their application to the pebble bed fluoride salt cooled high temperature reactor (PB-FHR). Berkeley, University of California, 2013.
46. **Касилов В.Ф., Дудолин А.А., Господченков И.В.** Эффективность использования парогазовой технологии в энергоблоке АЭС с ядерным реактором СВБР-100 // Теплоэнергетика. 2015. № 5. С. 14. <https://doi.org/10.1134/S0040363615050045>
47. **Касилов В.Ф., Дудолин А.А., Крашенинников С.М.** Разработка тепловой схемы для проекта парогазовой установки теплофикационного типа с ядерным реактором СВБР-100 // Теплоэнергетика. 2017. № 2. С. 20–27. <https://doi.org/10.1134/S0040363617020035>
48. **Cooper M.** Small modular reactors and the future of nuclear power in the United States // Energy Res. Social Sci. 2014. V. 3. P. 161–177. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2014.07.014>
49. **Нигматулин Б.И.** Оценка и оптимизация капитальных затрат АЭС // Изв. РАН. Энергетика. 2020. № 2. С. 28–48. <https://doi.org/10.31857/S0002331020020089>
50. **Abdulla A., Azevedo I.L., Morgan M.G.** Expert assessments of the cost of light water small modular reactors // Proc. of the National Academy of Sciences. 2013. V. 110. No. 24. P. 9686–9691. <https://doi.org/10.1073/pnas.1300195110>
51. **Lloyd C.A., Roulstone T., Lyons R.E.** Transport, constructability, and economic advantages of SMR modularization // Prog. Nucl. Energy. 2021. V. 134. P. 103672. <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2021.103672>
52. **Soderholm K.** Challenges of SMR licensing practices // AECL Nucl. Rev. (Online). 2012. V. 1. No. 2. P. 19–31. [Canada.]
53. **Licensing** small modular reactors: A state-of-the-art review of the challenges and barriers / R. Sam, T. Sainati, B. Hanson, R. Kay // Prog. Nucl. Energy. 2023. V. 164. P. 104859. <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2023.104859>
54. **US regulator** completes first SMR design certification rulemaking: Regulation & Safety – World Nuclear News. [Электрон. ресурс.] <https://world-nuclear-news.org/Articles/US-regulator-completes-first-SMR-design-certificat> (Дата обращения: 05.09.2023.)
55. **Аминов Р.З., Шкрет А.Ф., Гариевский М.В.** Тепловые и атомные электростанции: конкурентоспособность в новых экономических условиях // Теплоэнергетика. 2017. № 5. С. 5–15. <https://doi.org/10.1134/S0040363617050010>
56. **Билашенко В.П., Калантаров В.Е., Смоленцев Д.О.** Анализ пороговых значений технико-экономических характеристик атомных станций малой мощности // Изв. РАН. Энергетика. 2014. № 3. С. 89–96.
57. **Петрунин В.В.** Реакторные установки для атомных станций малой мощности // Вестник РАН. 2021. Т. 91. № 6. С. 528–540.
58. **Выбор** приоритетного варианта плавучего энергоблока по анализу технико-экономических показателей / С.М. Брыкалов, А.С. Балыбердин, Д.А. Нырков, Н.В. Шешина, Е.А. Гушина // Арктика: экология и экономика. 2022. Т. 12. № 4. С. 551–558. <https://doi.org/10.25283/2223-4594-2022-4-551-558>
59. **Перспективы** использования атомных энергетических технологий в Арктике / А.А. Саркисов, Д.О. Смоленцев, С.В. Антипов, В.П. Билашенко, М.Н. Кобринский, П.А. Шведов // Арктика: экология и экономика. 2022. Т. 12. № 3. С. 349–358. <https://doi.org/10.25283/2223-4594-2022-3-349-358>

Small Power Nuclear Plants: Technical Level and Prospects for Commercialization (Review)

V. O. Kindra^{a, *}, I. A. Maksimov^a, I. I. Komarov^a, S. K. Osipov^a, and O. V. Zlyvko^a

^a National Research University Moscow Power Engineering Institute, Moscow, 111250 Russia

*e-mail: kindra.vladimir@yandex.ru

Abstract—The active development of the Arctic and the Northern Sea Route determines the importance of the rapid development of energy-supply systems for remote regions. A key component of isolated power systems are low-power energy sources. The high cost of fossil fuels in remote regions, coupled with tightening environmental regulations, brings to the fore the challenge of implementing carbon-neutral energy generation technologies. Promising power plants, the performance of which is little dependent on weather conditions, and whose operation is not associated with the generation of greenhouse gas emissions, are low-power nuclear power plants. Currently, some countries are developing and implementing new types of reactor plants whose electrical power does not exceed 300 MW: according to the IAEA, there are more than 70 different projects. Modularity, versatility (in addition to power generation, many projects also provide for the production of thermal energy and hydrogen), increased compactness, and lower capital costs for construction compared to traditional high-power power units make it promising to create low-power reactor plants. This review presents an analysis of the current state of the problems in the design and implementation of such power plants. The technical level of domestic and foreign projects of small modular reactors (SMR) was assessed. Promising areas for the use of thermal energy from small modular installations have been identified, taking into account current trends in energy, including low-carbon and nuclear-hydrogen areas. Possible circuit solutions for the production of electricity based on advanced cycles, including the use of nontraditional working fluids, have been studied. The potential for commercialization of low-power nuclear power plant projects has been considered; the question of successful business implementation of power plants of this type remains open.

Keywords: low-power nuclear power plants, small modular reactors, autonomy, maneuverability, thermal circuits, hydrogen energy, energy efficiency, low-carbon energy