

ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИИ

ОБЗОР КРУПНЫХ НЕРЕАЛИЗОВАННЫХ ПРОЕКТОВ В ЭНЕРГЕТИКЕ

Н.И. Андриянов, нач. отд. ФГБНУ НИИ РИНКЦЭ, *andrnick@extech.ru*

В.Н. Долгова, вед. науч. сотр. ФГБНУ НИИ РИНКЦЭ, канд. экон. наук, *dolgovavn@extech.ru*

Рецензент: Г.В. Томаров, ООО «Геотерм-М», д-р техн. наук, *geotherm@gmail.com*

В связи с переходом к новому топливно-энергетическому мировому балансу все страны ждет набирающая темпы тенденция снижения доли нефти и угля среди первичных энергетических ресурсов и рост доли газа и неуглеродной энергии в структуре мирового потребления. Электроэнергетические системы будут основываться на выработке энергии ТЭС, АЭС, ГЭС, ВЭС и СЭС.

Для поддержания высокой конкуренции в области энергетики необходимо широкое распространение прорывных технологий и нетрадиционных альтернативных проектов в энергетической отрасли.

Целью статьи является обзор наиболее интересных альтернативных, но не реализованных по разным причинам проектов в области энергетики России.

В статье описаны преимущества и недостатки таких энергетических проектов, как строительство Пенжинской приливной электростанции (ПЭС), внедрение гелиевого производства, применение водоугольных технологий при сжигании угля, а также отличительные особенности альтернативной ториевой энергетики, варианты использования термоядерного синтеза, примеры сверхпроводящих накопителей.

Представленные в статье проекты являются примерами так называемых альтернативных источников энергии, или «зеленых» проектов в энергетике. Их применение имеет размытые временные границы в силу научных, экономических и политических причин.

Ключевые слова: энергетика России, энергетическая стратегия, водоуголь, водоугольное топливо (ВУТ), ториевая энергетика, Пенжинская приливная электростанция, гелиевые производства, сверхпроводящие накопители (СПИНЭ), термояд, термоядерная энергетика, термоядерные реакции.

OVERVIEW OF MAJOR UNREALIZED PROJECTS IN THE ENERGY SECTOR

N.I. Andriyanov, Head of Department, FSBSI SRI FRCEC, *andrnick@extech.ru*

V.N. Dolgova, Leading Researcher, FSBSI SRI FRCEC, Doctor of Economics, *dolgovavn@extech.ru*

In connection with the transition to a new fuel and energy world balance, all countries are waiting for a growing trend of a decrease in the share of oil and coal among primary energy resources and an increase in the share of gas and non-carbon energy in the structure of world consumption. Electric power systems will be based on the energy generation of thermal power plants, nuclear power plants, hydroelectric power plants, wind farms and SES.

In order to maintain high competition in the field of energy, it is necessary to widely disseminate breakthrough technologies and unconventional alternative projects in the energy industry.

The purpose of the article is to review the most interesting alternative, but not implemented for various reasons, projects in the field of energy in Russia.

The article describes the advantages and disadvantages of such energy projects as the construction of the Penzhinskaya tidal power plant (PES), the introduction of helium production, the use of water-coal technologies in coal combustion, as well as the distinctive features of alternative thorium energy, options for using thermonuclear fusion, examples of superconducting storage devices.

The projects presented in the article are examples of so-called alternative energy sources, or «green» projects in the energy sector. Their use has blurred time limits due to scientific, economic and political reasons.

Keywords: Russian energy industry, energy strategy, water coal, water coal fuel (VUT), thorium energy, Penzhinskayatidal power plant, helium production, superconducting storage (SPIN), thermonuclear fusion, thermonuclear energy, thermonuclear reactions.

Введение

В 2019 г. учеными Института энергетических исследований Российской академии наук (далее – ИНЭИ РАН) под руководством академика Макарова А.А. совместно с Центром энергетики Московской школы управления «Сколково» под руководством канд. экон. наук Митровой Т.А. был подготовлен «Прогноз развития энергетики мира и России до 2040 г.». Методология построения данного прогноза была основана на модельной оценке широкого сценарного диапазона вариантов развития энергетики мира в зависимости от скорости развития и трансфера технологий и госэнергополитики. При этом использовался Модельно-информационный комплекс ИНЭИ РАН – SCANER – постоянно развивающийся комплекс оптимизационных и имитационных моделей, а также баз данных, описывающих энергетику по 199 географическим узлам, 135 странам и группам стран [1].

Согласно разработанному ими прогнозу и Энергетической стратегии РФ до 2035 года [2], в ближайшем будущем человечество ждет изменение мирового топливно-энергетического баланса и переход к новому энергетическому миропорядку. Это связано с ростом численности населения планеты и различиями в темпах экономического роста стран и регионов. При этом общий рост мирового первичного энергопотребления замедлится к 2040 г., в том числе за счет энергоэффективности.

В структуре мирового потребления первичной энергии будет продолжаться тенденция снижения доли нефти и угля на фоне роста доли газа и неуглеродной энергии. «В конечном потреблении вырастет доля электрической энергии (около 25% общего потребления к 2040 г.), а доля неуглеродных среди первичных энергетических ресурсов, используемых для ее выработки, составит более 40%» [2].

После 2025 г. ученые прогнозируют замедление роста мирового спроса на нефть с возможным достижением пика спроса ранее 2030-х гг., который будет поддерживаться ростом потребления в транспортном секторе при снижении спроса в коммерческом и бытовом секторе, а также в электроэнергетике. В долгосрочной перспективе ожидается рост спроса на моторные топлива (автомобильные бензины, дизельное топливо и топливо для реактивных двигателей) со снижением потребления мазута и других темных нефтепродуктов, особенно в Европе. При этом использование моторных топлив на транспорте, в основном в развивающихся странах, компенсируется ростом энергоэффективности самих транспортных средств, а также ростом использования электромобилей и транспорта на газомоторном топливе. В свою очередь, одной из задач, стоящих в Энергетической стратегии РФ, является «развитие производства и увеличение объема потребления газомоторного топлива».

«Из ископаемых видов топлив только газ сможет нарастить свою долю в мировом энергобалансе с 22% до 24–26% при том, что уголь снизит свою долю с 28% до 19–23%» [1]. Это явление объясняется прежде всего ростом потребления электроэнергии и требованиями

экологической безопасности, так как при использовании природного газа (по сравнению с другими видами топлив) в атмосферу выбрасывается самый низкий объем парниковых газов. Также перспективным направлением использования природного газа в энергетике является производство из него водорода и метано-водородных смесей. Вместе с тем Российская Федерация ставит перед собой задачу вхождения в среднесрочной перспективе в число мировых лидеров по производству и экспорту сжиженного природного газа.

В то же время уголь как источник энергии останется самым дешевым и доступным, особенно для стран Азиатско-Тихоокеанского региона и Африки, а основными поставщиками угля на мировой рынок останутся Австралийский Союз и Российская Федерация. Однако в долгосрочной перспективе ожидаются спрос и рост цен на высококачественные коксующиеся угли и пылеугольные технологии.

Основу электроэнергетики большинства стран мира будут составлять электроэнергетические системы, базирующиеся на тепловых, атомных электростанциях, гидроэлектростанциях, а также ветро- и солнечных электростанциях.

Мир набирает высокие темпы развития и распространения прорывных технологий в области энергетики. Человечество входит в эпоху большой технологической и межтопливной конкуренции. Для всех сфер потребления появляется много конкурирующих между собой перспективных решений, готовых при росте цен доминирующего топлива оперативно предложить альтернативу и отвоевать рынок. Но при этом, учитывая высокую инерционность энергетической отрасли с ее значительной капитало- и ресурсоемкостью, а также долгосрочностью любого инвестиционного проекта, до 2035 г. учеными прогнозируется наибольшая стабильная составляющая ископаемых видов топлива с постепенным ростом доли возобновляемых источников энергии в мировом и национальном топливно-энергетическом балансе.

Основываясь на этом, в данной статье авторы сделали попытку привести примеры наиболее интересных проектов в области энергетики.

Пенжинская приливная электростанция – проект века

В 1972 г. в СССР появилась идея строительства крупнейшей в мире по выработке электроэнергии Пенжинской приливной электростанции (далее – ПЭС), которая должна была располагаться в северо-восточной части залива Шелихова (Охотское море).

Высота приливов в Пенжинской губе (рис. 1) достигает 12,9 м, что является наивысшим для всего Тихого океана показателем. При площади бассейна 20 530 км² это соответствует ежесуточному проходу 360 530 км² воды, что в 2030 раз превышает расход воды в устье крупнейшей реки Земли Амазонки (через устье в сутки проходит только ~19 км²). Гидрологический потенциал бухты примерно соответствует обеспеченной мощности 110 ГВт, или приблизительно 1 трлн кВт·ч электричества в год (например, мощность самой крупной Саяно-Шушенской ГЭС в России – 6400 МВт, а Ленинградской АЭС – 4000 МВт) (рис. 2) [3, 4].

Китай и Южная Корея уже реализуют аналогичные проекты приливных станций. В Китае в 1985 г. построена электростанция Цзянъся (3,2–3,9 МВт), и в дальнейшем планируется строительство более масштабных объектов в устье рек Ялу и Янцзы (22,5 ГВт, что, однако, в 5 раз меньше Пенжинской ПЭС). В Южной Корее, помимо крупнейшей на данный момент приливной электростанции Сихва (254 МВт), в провинции Кенги ведутся проектные работы по возведению похожего объекта в Инчхоне (планируемой мощностью 800–1320 МВт).

Однако проект может столкнуться с рядом проблем при реализации.

Высокая стоимость проекта: еще в СССР предполагаемая стоимость проекта составляла около 260 млрд долл., а сейчас эксперты оценивают ее в порядке 500 млрд долл. Однако возврат вложенных средств можно планировать за счет реализации жидкого водорода

(к 2050 г. планируется производить от 15 млн до 50 млн т водорода), который затем транспортировать к потенциальным потребителям. То есть Пенжинская ПЭС будет вырабатывать дешевое электричество, а вырабатываемое электричество можно использовать для добычи водорода из обычной воды. Ожидается, что объем добытого таким образом водорода позволит обеспечить России 25 % мирового водородного рынка [5]. Но у водорода имеются свои недостатки: взрывоопасность при хранении, он требует особых условий хранения в сжиженном состоянии и транспортировки по специальным трубопроводам, низкий КПД (при высокой энергозатратности его добычи – низкий уровень выработки энергии на выходе), а также поиск рынков сбыта.



Рис. 1. Расположение Пенжинской губы



Рис. 2. Проект Пенжинской ПЭС [5]

Отсутствие рынка сбыта электроэнергии, с учетом непостоянства выработки электроэнергии. Предлагаются варианты экспорта электроэнергии в страны Южной Азии, строительство линий электропередач в Хабаровском и Приморском краях, в Японию и Китай. Однако потребуются дополнительное строительство компенсирующих объемов регулирующей генерации или поиск неравномерно потребляющего потребителя [5].

В свою очередь, преимуществами приливной электростанции являются следующие:

- ПЭС не выбрасывает углекислый газ и вообще не имеет выбросов;
- ПЭС имеет на 100 % возобновляемый (бесконечный) источник энергии;
- ПЭС безопасна с точки зрения катастроф;
- ПЭС выдает очень низкую стоимость электроэнергии.

С 2021 г. ООО «Н2 Чистая энергетика» планирует строительство водородно-энергетического кластера на основе Пенжинской ПЭС. Проект предполагает, помимо строительства самой ПЭС, создание завода по производству водорода (до 5 млн т/год) методом электролиза воды и по его оживлению, завода по производству аммиака (до 31 млн т/год), а также ветровой электростанции (далее – ВЭС) вблизи с. Тиличи (рис. 3) [6].

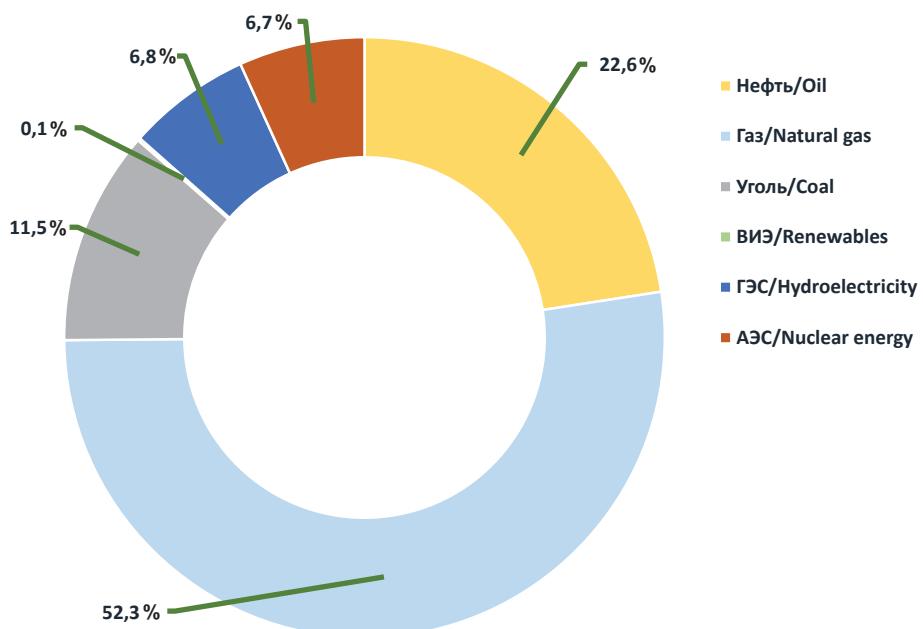


Рис. 3. Планируемый водородно-энергетический кластер на основе Пенжинской ПЭС [6]

Для передачи электроэнергии ПЭС и ВЭС планируется сооружение линии электропередачи (ЛЭП) протяженностью 230 км (от ПЭС) и 30 км (от ВЭС).

На первоначальном этапе рассматривается транспортировка сжиженного водорода с помощью танк-контейнеров, а аммиака – контейнер-цистерн, а в дальнейшем – с использованием специализированных судов. Для отгрузки продукции планируется создание высокоскоростного морского терминала в заливе Корфа, рынок сбыта – страны Азиатско-Тихоокеанского региона.

Плановый срок реализации 1-й очереди кластера – 2034 г., начало отгрузки продукции ВЭС – 2026 г.

Гелиевые производства – второе место после водорода

Одной из стратегических задач развития энергетики Российской Федерации является «создание гелиевых производств и инфраструктуры для транспортировки жидкого гелия на Дальнем Востоке, создание системы долгосрочного хранения гелия и его поставок на мировой рынок» [2]. В связи с этим начаты разработки гелийсодержащих месторождений Восточной Сибири и Дальнего Востока.

В 2023 г. глава Якутии Айсен Николаев в рамках Восточного экономического форума подписал трехстороннее соглашение с Корпорацией развития Дальнего Востока и компанией ДББ о сотрудничестве в целях строительства комплекса по переработке природного газа в Мирнинском районе для извлечения гелия.

Объект появится на Среднеботубинском нефтегазоконденсатном месторождении, которое разрабатывает «Алроса-Газ». Пилотное производство планируется запустить в 2025 г. Ожидается, что к 2028 г. комплекс будет давать в год 4 млн м³ гелия, который направят на нужды внутреннего рынка и на экспорт в страны ближнего зарубежья [7]. На данный момент в России существуют три предприятия, производящие гелий:

- Оренбургский гелиевый завод ПАО «Газпром» мощностью 6 млн м³/год;
- в 2021 г. запущена первая очередь (из шести) Амурского газоперерабатывающего завода ПАО «Газпром» (сейчас в эксплуатации три технологические линии, к 2025 г. ожидается ввод шести линий при выходе на полную мощность до 60 млн м³/год гелия);
- в июне 2023 г. Иркутская нефтяная компания (ИНК) в режиме опытного применения запустила свое гелиевое производство на Ярактинском нефтегазоконденсатном месторождении. Предприятие постепенно выводят на технологический режим, при котором его производительность составит чуть больше 14 млн м³/год гелия.

Гелий производится как побочный продукт при добыче природного газа, состоящего из разных фракций. Крупнейшими странами – его производителями, по данным Геологической службы США, являются сами Штаты (77 млн м³/год), Катар (51 млн м³/год) и Алжир (14 млн м³/год), на Россию приходилось 5 млн м³/год. Реализация проектов ИНК и «Газпрома» способна увеличить наши гелиевые мощности до 80 млн м³/год. Якутия добавит еще 4 млн м³/год. Это обеспечит нашу независимость по стратегическому сырью от недружественных стран и создаст возможности для экспорта на растущем мировом и внутреннем рынках.

Гелий используется в сжиженном и газообразном состояниях. Главная особенность сжиженного гелия – низкая точка кипения ($-268,9^{\circ}\text{C}$) и высокая теплопроводность. Это позволяет быстро охлаждать предметы – от синхрофазotronов в Дубне до аппаратов МРТ в больницах и диагностических центрах [8].

Гелий эффективно поглощает и отводит тепло, выделяющееся в активной зоне ядерного реактора. Низкая плотность гелия позволяет ему легко циркулировать, достигая всех зон реактора и способствуя эффективной теплопередаче. Его инертная природа обеспечивает совместимость с материалами реактора, сводя к минимуму риск химических реакций или коррозии [9]. В ядерных реакторах гелий служит теплоносителем двумя основными способами: в качестве охлаждающей жидкости в первом контуре и в качестве замедлителя в некоторых конструкциях реакторов. В первичном контуре гелий поглощает тепло из активной зоны реактора и передает его во вторичный контур или теплообменник, где он используется для получения пара для выработки электроэнергии. Превосходная теплопроводность гелия обеспечивает эффективную теплопередачу, позволяя реактору работать при высоких температурах с сохранением запаса прочности. Низкая температура его кипения обеспечивает эффективный отвод тепла даже при повышенных температурах, снижая риск перегрева и потенциального повреждения компонентов реактора. Из-за своей низкой реакционной способности гелий не подвергается химическим реакциям и не становится радиоактивным при нормальных условиях эксплуатации. Кроме того, низкое сечение поглощения нейтрон-

нов гелием делает его идеальным выбором для замедления реактора. Это позволяет нейтронам проходить без значительных потерь энергии, способствуя более эффективному захвату нейтронов и реакциям деления. Например, гелиевые циклы Брайтона, в которых гелий используется в качестве рабочей жидкости в современных реакторах с газовым охлаждением, обеспечивают повышенную тепловую эффективность и сниженное воздействие на окружающую среду.

Работа индикаторов утечек основана на высокой текучести гелия. Гелий используют при лазерной сварке в смеси с другими газами.

Газообразный гелий известен прежде всего как наполнитель воздушных шариков. Помимо этого, он не токсичен и входит в состав дыхательных смесей, например для аквалангистов.

Гелием продувают топливные баки жидкостных ракет. В пищевой промышленности его используют как упаковочный газ. Гелий нужен при производстве оптического волокна, для создания чистой среды, исключающей попадание воздуха.

Без газообразного гелия невозможны современные метеозонды и дирижабли (рис. 4).



Рис. 4. Аванпроект дирижабля на гелии [10]

Большой интерес вызывает проект строительства транспортных дирижаблей на гелии для Якутии [10].

Консорциум «Дирижабли Якутии» подготовил аванпроект воздушного судна на гелии (с грузоподъемностью до 30 т и дальностью полета до 4 тыс. км, длиной 130 м, диаметром 30 м). Заказчиком выступает государственный Фонд перспективных исследований (ФПИ). Современные мягкие и полужесткие дирижабли не обладают теми недостатками, которые были причиной катастроф судов с жесткой конструкцией.

Помимо дирижаблей консорциума разрабатывается дирижабль-прототип SW-12 объемом 12 000 м³ и дальностью 4000 км. Его можно применять на Севере для перевозки людей и грузов, мониторинга, поисково-спасательных работ, обучения пилотов и техников. Дирижабли в перспективе могут быть использованы в качестве средств аварийного спасения космонавтов в случае прерванного старта с космодрома Восточный. Группировка из восьми воздушных судов сможет долгое время барражировать в заданном районе в ожидании старта. При скорости 100 км/ч одно из судов за два часа сможет дойти до точки спасательных работ.

Российские специалисты изучают также возможность погрузки-разгрузки морских судов с помощью дирижаблей.

Водоугольное топливо – технологии «чистого угля»

Еще многие годы уголь останется основным ископаемым ресурсом в энергетике, но с каждым годом все больше и больше растет интерес к различным пылеугольным технологиям, так называемым технологиям чистого угля. В данной статье описывается один из таких видов топлива – водоугольное топливо (ВУТ), или водоуголь, – это мелкодисперсная смесь или суспензия измельченного угля (60–70 %) и воды (30–40 %) [11]. Во многих случаях для стабилизации ВУТ при хранении, транспортировке и перегрузке используют стабилизирующие добавки – пластификаторы (1 %). Но возможно приготовление ВУТ без пластификаторов, стоимость которых относительно высока.

ВУТ обладает рядом преимуществ перед традиционным углем:

- при сжигании ВУТ снижается потребление угля на 20–45 % за счет значительного уменьшения механического недожога [12];
- можно использовать антрациты без дополнительной газовой «подсветки»;
- практически не образуется жидких шлаков при сжигании ВУТ, а следовательно, не происходит «зашлаковывания» поверхностей теплообмена;
- образующаяся при сжигании ВУТ мелкодисперсная зола безвредна и может быть полностью утилизирована в промышленности строительных материалов;
- в продуктах сжигания ВУТ содержится существенно меньше оксидов азота и серы, чем в традиционных углях, а также не содержится полициклических ароматических углеводородов, присутствующих в продуктах горения мазута;
- водоуголь позволяет существенно сократить затраты при производстве тепловой и электрической энергии;
- ВУТ является пожаро- и взрывобезопасным на всех стадиях его производства, транспортировки и использования;
- процессы изготовления и сжигания разграничены, что позволяет не загрязнять окружающую среду при транспортировке угля. Доставка топлива осуществляется в цистернах автомобильным или железнодорожным транспортом.

Однако для приготовления ВУТ должны применяться только высококачественные энергетические угли с низким содержанием серы и золы. Пластификаторы используют для обеспечения особых характеристик топлива: низкой вязкости, хорошей текучести, длительной стабильности взвешенных частиц угля. Наиболее часто применяются примеси на основе технических лигносульфонатов, гуминовые реагенты, полифосфаты, которые эффективно действуют в щелочной среде.

В СССР технологиям создания ВУТ были посвящены многие научно-исследовательские работы. В 1983 г. в Москве был создан институт «ВНИИПИГидротрубопровод» с подразделением в городе Новокузнецке. Спроектированы и построены опытно-промышленный комплекс, состоящий из цеха приготовления водоугольного топлива, углепровода Белово – Новосибирск для транспортировки ВУТ на расстояние 250 км и цех сжигания на Новосибирской ТЭЦ-5, который потом был закрыт в 1993 г. Работы в данном направлении были возобновлены в России в 2004 г., и опытно-промышленный центр приготовления ВУТ был построен в поселке Енский Ковдорского района Мурманской области. Цех приготовления ВУТ в Енском использовал технологию предыдущего поколения (вибромельницы) для мокрого помола угля и приготовления ВУТ. Также водоугольное топливо используется в Новокузнецке на Абагурской аглофабрике с 1999 г. и на предприятиях Кузбасса с начала XXI века.

К основным проблемным направлениям развития данных технологий, влекущих за собой большой потенциал научно-исследовательских работ, можно отнести следующие.

Технологии транспортировки и хранения водоугольных суспензий. До сих пор нет однозначной оценки преимущества трубопроводного транспортирования ВУТ перед железнодорожным. При эксплуатации углепровода Белово – Новосибирск обнаружилась группа

неучтенных и непроработанных проблем, в том числе недостаточным был анализ условий эксплуатации трубопровода в зимних условиях Западной Сибири.

Технологии приготовления ВУТ обладают большим потенциалом научного-технического развития, например возможно применение разных поверхностно-активных веществ в роли пластификаторов. Также целесообразно совершенствование технологических схем топливо-подготовки в условиях цехов, максимально приближенных непосредственно к котельным агрегатам. В этом случае проблема транспортировки ВУТ отсутствует.

Технологии сжигания, включая термоподготовку, ВУТ. Решение проблемы оптимизации процесса топливосжигания, т. е. глубокое регулирование температур топочной среды, невозможно экспериментальным путем, оно требует разработки теории топочных процессов применительно к сжиганию частиц влагонасыщенных углей.

Таким образом, технологии разработки и внедрения ВУТ для современной науки являются наукоемкими и требуют проведения фундаментальных и экспериментальных исследований на всех технологических стадиях «топливоприготовление – транспортировка – сжигание» ВУТ.

Основным разработчиком водоугольных технологий в РФ является Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН в Новосибирске (далее – ИТ СО РАН).

В 2020 г. в ИТ СО РАН проведено комплексное исследование влияния перегретого водяного пара на процессы горения жидкых углеводородов в газофазных и дисперсных потоках. Созданы оригинальные горелочные устройства различного типа (мощностью до 50 кВт), применимые в тепловой энергетике. Обоснован способ управления показателями горения, позволивший достичь низкой эмиссии CO и NO_x в режиме устойчивого воспламенения и высокой полноты сгорания топлива. А в 2022 г. было разработано горелочное устройство для решения задачи эффективного и экологичного сжигания топлива (в том числе жидких горючих отходов) для производства тепловой энергии на объектах малой энергетики. Был разработан перспективный новый метод сжигания жидкого топлива с впрыском перегретого водяного пара в зону горения. На основе результатов лабораторных исследований найдены оптимальные соотношения режимных параметров (расходы топлива, пара и воздуха), при которых обеспечиваются лучшие теплотехнические и экологические показатели, при соответствии европейскому нормативу EN:267.

Альтернативная ториевая энергетика

Вернемся к Энергетической стратегии РФ: в ней заложена центральная идея о том, что в ближайшем будущем необходим переход от ресурсно-сырьевого к ресурсно-инновационному развитию страны.

По данным отчета ВР на 2020 г., структура энергопотребления в России представлена на рис. 5, из которой видно, что на долю атомных электростанций приходится 6,7 % потребляемой энергии, или 1,9 ЭДЖ, вырабатываемой 11 АЭС.

Одной из целей Стратегии является формирование замкнутого топливного цикла ядерной энергетики. Для этого необходима модернизация ядерной энергетики «реакторами на быстрых нейтронах, которые снабдят всю ядерно-энергетическую систему новым топливом из изотопов урана-238 и тория-232» [13].

Торий не является ядерным топливом. Его применение имеет смысл только в составе замкнутого ядерного топливного цикла (далее – ЗЯТЦ). Так же как и ЗЯТЦ на уране, торию будут нужны быстрые реакторы с коэффициентом воспроизведения больше 1, радиохимические перерабатывающие заводы и пр. [14].

Загружая уран-плутониевое топливо в активную зону и ториевое топливо в зоны воспроизводства быстрых реакторов и используя уран-ториевое топливо в термоядерной реакции, можно существенно облегчить решение проблем ресурсообеспеченности ядерной энергетики и обращения с минорными актинидами и плутонием в ядерном топливном цикле.

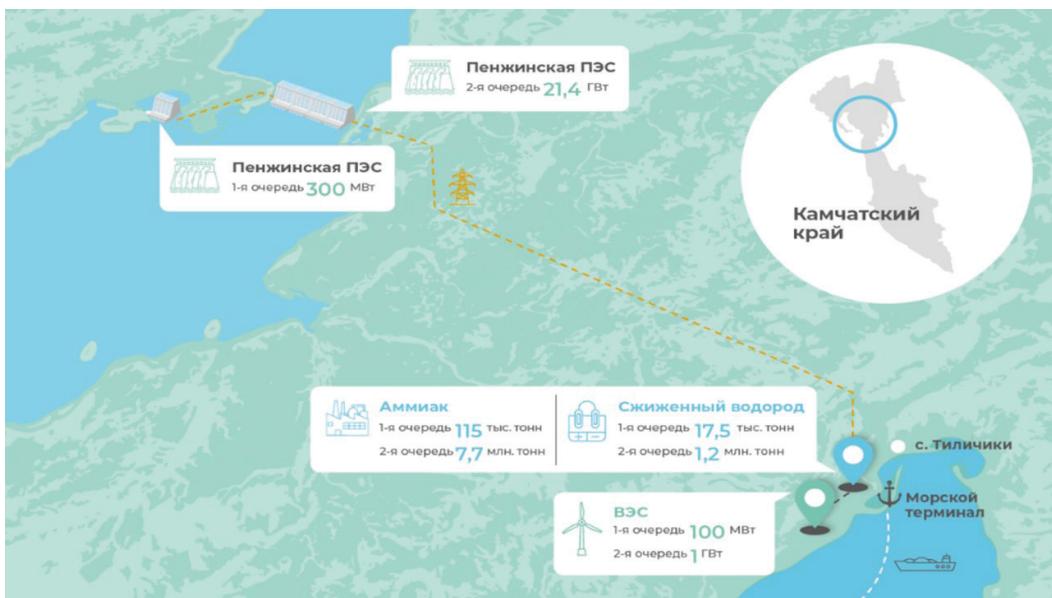


Рис. 5. Структура энергопотребления по источникам энергии в целом в России за 2020 г., %

Источник: отчет ВР

Для быстрых реакторов наиболее эффективный топливный цикл можно создать при использовании урана-238 в качестве практически неограниченного ресурса, а именно: вовлечение тория в ядерный топливный цикл, поскольку он эффективнее по сравнению с ураном-238 взаимодействует с нейтронами в тепловом спектре нейтронов. С одной стороны, это позволяет решить проблемы ресурсообеспеченности топливной реакции, так как получаемый при этом уран-233 более эффективен в топливной реакции, чем плутоний, а с другой стороны — проблемы обращения с радиоактивными отходами и их окончательного удаления из среды обитания, так как при использовании тория наработка минорных актинидов снижается на порядок. Это, в свою очередь, позволит улучшить экономическую эффективность и адаптационные способности ядерной энергетики за счет снижения доли быстрых реакторов и реакторов-выжигателей минорных актинидов в системе ядерной энергетики.

Положительный потенциал применения тория в ядерной энергетике состоит из нескольких преимуществ.

Физические свойства тория: торий не горит, не поддерживает цепную реакцию. «Но, как «негорючий» уран-238, в активной зоне под градом нейтронов переходит в «цепной» изотоп. В случае тория это уран-233, который может быть использован в качестве ядерного горючего. Ториевый цикл подразумевает высокое обогащение урана (так как реактор должен работать в качестве размножителя — на быстрых нейтронах). Затем часть изъятого урана-238 заменяется в таблетках на торий-232. После выгорания стержней из них может быть извлечен уран-233. И его даже окажется больше, чем израсходовано 235 изотопа» [15].

В земной коре тория в несколько раз больше, чем урана. Его извлечение является побочным продуктом при добыче редкоземельных металлов, а радиоактивность при добыче в 2 раза меньше, чем при добыче урана.

Меньшее количество трансурановых нуклидов в облученном ториевом топливе по сравнению с облученным урановым топливом. То есть топливо на основе ториевого цикла ста-

новится нерадиоактивным уже через несколько сотен лет против сотен тысяч у уранового цикла. Будущим поколениям мы оставляем все меньше и меньше дешевого нейтронного ресурса в виде урана-235 и все больше и больше загрязненных отходов в виде радиоактивного отвального урана. Минимизировать радиоактивность и поддержать нейтронный потенциал можно за счет введения тория в систему ядерной энергетики как дополнительного ресурса. Сейчас ядерная энергетика вступает в фазу применения урана-235 не в качестве основного источника получения энергии, а в качестве источника нейтронов.

Однако существует и ряд недостатков использования тория в качестве топлива для ядерной энергетики.

Торий надо добывать, в то время как 3,5 млн т добываемого урана уже лежит на складах.

При трансмутации тория-232 в уран-233 образуется промежуточный протактиний-233, который довольно долго распадается и является «нейтронным ядом». Период полураспада протактиния – в 10 раз больше, т. е. его содержание в топливе в 1000 раз больше. Это вызывает заметные проблемы при попытке сделать «классический» быстрый реактор на уране-233 и тории-232. Отсюда появилась идея сделать жидкокислородный реактор – емкость с расплавом ядерной соли $\text{FLiBe} = \text{LiF} + \text{BeF}_2$ и добавленными туда фторидами тория-232 и урана-233.

Такой реактор управляет с помощью контроля утечки нейтронов из активной зоны и фактически не имеет никаких исполнительных механизмов внутри активной зоны, а главное – постоянно очищается радиохимическим способом от протактиния-233 и продуктов распада урана-233. Но в этом расплаве быстро образуется вся таблица Менделеева, и сделать материал, который будет удерживать такую смесь без коррозии в условиях высокой температуры и радиации, пока не получается.

Для вовлечения тория в ядерный топливный цикл в ближайший период времени потребуется значительный объем научных и технологических исследований. Они должны включать определение обратных связей в активной зоне с ториевым топливом на основе урана-233. Должны быть созданы все условия для коммерческого использования ториевого топлива в ЗЯТЦ.

В НИЦ «Курчатовский институт» был выполнен существенный объем расчетно-экспериментальных исследований по отработке стержневых ТВЭЛ с уран-ториевым топливом для легководных энергетических реакторов, микротоплива для высокотемпературных газоохлаждаемых реакторов, расплавов ториевых фторидных солей для ЖСР и бланкетов гибридных систем. С помощью внедрения ториевого топлива можно существенно расширить кампанию перспективных реакторов ВК-100, ВТГР-100, НИКА-330, ВТРС-50, например для выбора автономного источника энергообеспечения г. Севастополя.

Таким образом, еще долго в системе ядерной энергетики подавляющее количество реакторов будет работать на тепловых нейтронах. При этом торий может оказаться очень эффективным дополнительным ресурсом, поскольку он принципиально лучше урана-238 в тепловом спектре нейтронов.

Термояд – до массовой термоядерной энергетики 20 лет – и всегда будет 20 лет, пока не возникнет необходимость

Термоядерными реакциями (термоядерным синтезом или термоядом) называют реакции слияния легких ядер в одно целое новое ядро, в результате которого выделяется большое количество энергии.

Количество исследовательских ядерных реакторов, по данным МАГАТЭ (дата обращения: 23.01.2022), в России составляет 124 (в том числе экспериментальных – 52), а в мире – 842 (в том числе экспериментальных – 220).

Термоядерная энергетика с 1960-х гг. обещает нам следующие преимущества перед ядерными реакторами.

Первое преимущество термоядерного реактора: килограмм плутония при распаде дает 23,2 млн киловатт-часов, а килограммдейтерия и трития в термоядерных реакторах – 93,7 млн киловатт-часов на килограмм. Разница – в 4 раза. К тому же воды на планете больше, чем ядерного топлива, в соотношении 1/6500 всей воды.

Второе преимущество термоядерного реактора: при слиянии ядер атомов его топлива получаются гелий и нейтрон. Нейтрон из реактора не улетает, а гелий безвреден. Какое-то количество радиоактивного трития в процессе утекает из зоны слияния ядер, но из реактора не выходит. Полураспад трития – 12,3 года, заметно меньше, чем у типичных опасных изотопов, остающихся от распада атомов урана и плутония (например, нестабильные изотопы цезия). Если с отработавшим топливом АЭС ничего не делать, оно останется опасным тысячи лет, то отработавшее топливо термоядерного реактора будет безопасно уже через 150 лет.

Третье преимущество термоядерного реактора: в отличие от ядерного, в нем невозможна самоподдерживающаяся реакция. Без огромных усилий по поддержанию высокого давления и температуры реакция сразу остановится. Окружающее вещество реактора реакцию подпитать никак не может: там ядра атомов тяжелее дейтерия и трития. Их слияние просто не даст выделения энергии, которое могло бы расплавить активную зону (как на Фукусиме) или перегреть теплоноситель (как в Чернобыле).

Однако большим недостатком термояда является его высокая стоимость.

Для слияния ядер атомов им нужно преодолеть кулоновский барьер. В центре Солнца – десятки миллионов градусов и огромное давление. В термоядерном реакторе такого давления нет.

Магнитная ловушка такого типа требует больших сверхмощных магнитов, сделанных из сверхпроводящих материалов и охлаждаемых жидким гелием.

Примером такого мегапроекта является Международный экспериментальный термоядерный реактор (ИТЭР), или токамак («тороидальная камера с магнитными катушками»), идея создания которого зародилась в середине 1980-х гг., строительство началось в 2010 г., летом 2020 г. началась сборка реактора. Срок окончания постройки запланирован на 2025 г. Странами-участниками данного проекта являются: Европейский союз, Россия, Великобритания, Швейцария, Индия, Китай, Южная Корея, Канада, Австралия, США, Япония, Таиланд, Казахстан.

На юг Франции 01.11.2022 на площадку сооружения международного термоядерного экспериментального реактора ИТЭР была отправлена российская катушка полоидального поля PF1 (диаметр – 9 м, масса – 200 т), являющаяся одной из шести катушек полоидального поля в магнитной системе, которая служит для удержания плазмы в реакторе ИТЭР. Это одна из 25 систем, входящих в сферу ответственности РФ в рамках международного проекта ИТЭР. Этапы создания катушки: первая из восьми двухзаходных галет была намотана и квалифицирована в 2016 г., последняя – в 2019 г. В марте 2021 г. успешно завершилась вакуумно-нагнетательная пропитка обмотки катушки, в марте 2022 г. российская катушка успешно прошла серию приемочных испытаний перед отправкой.

Соглашение об изготовлении и поставке катушки PF-1 между российским Агентством ИТЭР и Международной организацией ИТЭР заключено в 2011 г. Это одна из двух катушек полоидального поля, изготовление которых происходит в странах-участницах проекта (вторая катушка PF-6 была произведена в Китае, и в апреле 2021 г. она установлена в шахту реактора). Остальные четыре ввиду большого размера собираются непосредственно на площадке сооружения будущей установки. Отправка российской магнитной катушки стала результатом усилий целого ряда научных коллективов, которые на протяжении более чем 20 лет занимались проектированием электромагнитной системы токамака, созданием и серийным выпуском сверхпроводников и собственно созданием катушки.

Экспериментальный термоядерный реактор ИТЭР стоит «25 миллиардов евро, что равно стоимости шести гигаваттных реакторов Росатома. У ИТЭР мощность всего лишь 500 «тепловых» МВт» [16]. Причем реактор экспериментальный – он не может выдавать ее постоянно, только во время коротких импульсов. А его энергозатраты в режиме нагрева могут превышать 700 МВт, что больше, чем возможная энергетическая отдача.

Размеры реактора в ИТЭР: высота 30 м, диаметр 30 м (рис. 6). Обычный атомный реактор БН-800 имеет высоту активной зоны менее метра, а диаметр – около 2,5 м. При этом его постоянная тепловая мощность – более 2000 мегаватт. Естественно, что здание вокруг ИТЭР (и его преемников) радикально дороже, чем вокруг БН-800.



Рис. 6. Сверхпроводниковый электромагнит ИТЭР диаметром 18 м и весом 400 т, а также камера для его пропитки и упаковка для транспортировки магнита [16]

Доля цены топлива (дейтерия, трития, урана или плутония) составляет всего лишь 5 % в стоимости итогового киловатт-часа, т. е. изменения цен на топливо на стоимость электричества почти не влияют, а влияют капиталовложения при строительстве, и они у термоядерных реакторов намного выше, чем у АЭС.

Поэтому вопрос о том, чтобы АЭС заменить термоядом, остается открытым, но в то же время ИТЭР остается грандиозным дорогостоящим научным проектом мирового уровня, позволяющим больше узнать о контроле над высокотемпературной плазмой, что необходимо для фундаментальной физики.

В России 18.05.2021 в НИЦ «Курчатовский институт» была запущена новая термоядерная установка токамак Т-15МД, аналогов которой нет в мире (это модифицированная версия комплекса Т-15, работавшего в Курчатовском институте с конца 1980-х гг.). В ходе модернизации реактор Т-15МД получил ряд новых систем, однако его общая архитектура и принципы работы не претерпели принципиальных изменений. Как и ранее, токамак должен создавать и поддерживать при помощи магнитного поля плазменный шнур. Реактор образует шнур с аспектным отношением 2,2 и током плазмы 2 МА в магнитном поле 2 Т. Длительность непрерывной работы – до 30 с.

Подобный термоядерный реактор должен помочь заменить атомные электростанции и работать на безопасном и доступном топливе – дейтерии и тритии. В апреле 2023 г. на токамаке Т-15МД была получена первая термоядерная плазма.

Полноценный ввод в эксплуатацию, позволяющий проводить все необходимые эксперименты, состоится в 2024 г. Эксперименты на ней станут частью масштабной международной программы, направленной на создание промышленной термоядерной энергетики, так как она входит в структуру ИТЭР [17]. По мнению международных ученых, российские специалисты занимают лидирующие позиции по работе с токамаками.

Согласно федеральной программе развития синхротронных и нейтронных исследований Курчатовский институт создает по всей стране целую сеть мегаустановок нового уровня [18].

Помимо данного токамака в России еще есть Т-11М и «Глобус-М».

Токамак Т-11М находится в Троицком институте (ТРИНИТИ), параметры установки: ток в плазме – 0,1 МА, температура плазмы – 400 эВ. Один из реально действующих в настоящее время российских токамаков предназначен для проведения экспериментов в поддержку программ Российской Федерации по управляемому термоядерному синтезу (УТС) и международного проекта ИТЭР. Данная установка не требует больших материальных затрат по сравнению с крупными термоядерными установками. На установке ведутся исследование ионно-циклotronного нагрева плазмы, изучение динамики срыва разряда, отработка новых диагностик плазмы, исследование материалов первой стенки, разработка методов ее защиты.

Токамак «Глобус-М» – первый в России сферический токамак, созданный в ФТИ им. А.Ф. Иоффе в 1999 г., а в 2018 г. запущена его модернизированная версия «Глобус-М2». Установка предназначена для исследования физических процессов и отработки технологий и инженерных решений, связанных с нагревом, удержанием и устойчивостью субтермоядерной плазмы в сферической конфигурации с дивертором. Сферические токамаки представляют собой предельный случай обычного токамака и характеризуются малым отношением радиусов тора (спектральным отношением). Достигнутые на сферических токамаках результаты позволяют рассматривать установки данного типа в качестве привлекательной потенциальной основы для создания устройств масштаба термоядерного источника нейтронов, а также, в долгосрочной перспективе, термоядерного реактора.

Сверхпроводящие накопители (СПИНЭ) – прототип накопителя электроэнергии будущего

Одним из интересных индукционных накопителей электроэнергии является СПИНЭ – накопитель, который «запасает энергию в магнитном поле индукционной катушки, в которой ток циркулирует без потерь. Важнейшим преимуществом индуктивного накопителя является его быстродействие, достигающее единиц миллисекунд, что позволяет реагировать на самые внезапные аварии в энергосистеме» [19].

В конструкции СПИНЭ можно условно выделить три основных конструктивных узла: собственно магнитная система, криогенная система и система связи с внешней сетью, так называемый преобразователь-инвертор. Метод накопления электроэнергии с помощью СПИНЭ отличается экологической чистотой. Не используются вредные материалы, никаких химических реакций не происходит. Отходы производства отсутствуют.

В феврале 2023 г. в открытых источниках появилась информация, что ученые Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ» разрабатывают накопители энергии нового типа, базирующиеся на свойствах современных высокотемпературных сверхпроводящих материалов [20]. Разработка поддержана государственной программой «Приоритет-2030» в рамках подпроекта «Новые способы накопления и транспортировки энергии: сверхпроводниковый энергетический кластер» Стратегического проекта «Ядерные энерготехнологии нового поколения и экстремальные состояния вещества».

В данном проекте предлагается обмотку из сверхпроводящего материала запитать электрическим током, а затем замкнуть саму на себя, т.е. произойдет не короткое замыкание (как это было бы в обычной электрической цепи), а электрический ток начнет течь в замкнутой цепи по кругу – и он тоже, почти без потерь, будет сохранять величину тока, а зна-

чит, и запасенную энергию, в течение недель, а может, и месяцев (в зависимости от степени оптимизации внутренних потерь). Энергию из такого накопителя можно частично или полностью перенаправлять в случае необходимости на полезную нагрузку. В 2023 г. в НИЯУ МИФИ планируют принципиально разработать конструкцию индукционного накопителя «на бумаге» и рассчитать его технические характеристики.

Главное преимущество накопителей нового типа заключается в их емкости: по отношению плотности энергии к массе накопители на сверхпроводниках должны в разы превосходить обычные аккумуляторы. Также немаловажной является возможность частичного снятия энергии и их подзарядки в процессе работы.

Недостатком является использование в них в качестве композитных высокотемпературных сверхпроводников и магнитов дорогих редкоземельных металлов.

Данные накопители могут найти применение в «зеленой» энергетике и промышленности. Например, они могут использоваться для увеличения равномерности генерации энергии на солнечных и ветровых электростанциях: когда ветер или солнце есть, накопитель будет подзаряжаться, когда же природные факторы дадут сбой – накопитель начинает отдавать энергию в сеть. Также они могут использоваться в качестве резервных источников питания на промышленных предприятиях, на которых большое значение имеет непрерывность производства. Не исключено использование таких накопителей на крупном электротранспорте (вроде электробусов).

Сверхпроводящие индуктивные накопители электромагнитной энергии представляют собой пример одного из уникальных технических использований явления сверхпроводимости. Это соленоиды, специально предназначенные для накопления и выдачи токов по требованию. Плотность энергии, запасенной в магнитном поле накопителя, на два порядка больше, чем в емкостном накопителе (конденсаторной батарее), а отдаваемые импульсные мощности могут достигать величин в десятки миллионов киловатт. Время вывода энергии из сверхпроводящего накопителя в зависимости от конструкции и запасенной энергии – от тысячных долей секунды до часов.

В настоящее время созданы сверхпроводящие индуктивные накопители на энергию 30 МДж. Обычно они отдают энергию в виде импульсов. Современные сверхпроводящие накопители имеют максимальный ток в импульсе 10000 А и напряжение 50 кВ, максимальную мощность 500 МВт при длительности импульса 5 мс.

Выводы

По результатам представленного обзора интересных проектов в энергетике России можно сделать вывод о том, что все вышеперечисленные проекты относятся к альтернативным «чистым» источникам энергии:

– проект Пенжинской ПЭС по масштабам и научной составляющей сопоставим с амбициозной задачей планетарного масштаба, как, например, строительство Суэцкого и Панамского каналов. Планируемой Пенжинской ПЭС по мощности уступает на порядки даже знаменитая крупнейшая ГЭС «Три ущелья» в провинции Хубэй Китая, которая, по расчетам ученых НАСА, влияет на изменение скорости вращения Земли. Поэтому при строительстве Пенжинской ПЭС необходимо учитывать силу «приливного торможения» скорости вращения Земли;

– очень заманчивой является идея перевозки грузов на гелиевых безопасных дирижаблях; – угольного топлива в мире хватит еще на 200 лет, и есть места (Китай, Индия, Южная Корея, Япония, Германия и др.), где он будет долго востребован, поэтому вопрос использования «чистого» угля остается актуальным;

– минимизировать радиоактивность и поддержать нейтронный потенциал можно за счет введения тория в систему ядерной энергетики как дополнительного ресурса, чтобы оставить будущим поколениям больше нейтронного ресурса и меньше загрязненных отходов;

– токамаки предназначены для проведения исследований ионно-циклотронного нагрева плазмы, изучения динамики срыва разряда, отработки новых диагностик плазмы, исследований материалов первой стенки, разработки методов ее защиты. Они не требуют больших материальных затрат по сравнению с ИТЭР, который является грандиозным дорогостоящим исследовательским проектом мирового уровня, позволяющим больше узнать о контроле над высокотемпературной плазмой, что необходимо для фундаментальной физики;

– СПИНЭ может решить главную проблему «зеленой» энергетики – сгладить неравномерности выработки электроэнергии ВЭС и СЭС.

Даже при том, что некоторые вышеперечисленные проекты задумывались еще во времена СССР, решение их требует учитывать современные условия в рамках выбросов парниковых газов, а также накопления всех видов отходов ядерной энергетики (минорные актиниды, отходы ядерного топлива, отвальный уран) и технологий их снижения, а в перспективе – их ликвидации. Приходится констатировать, что до сих пор не разработан способ полного избавления от ядерных отходов.

При сложившемся переходе к новому энергетическому этапу их применение для разных стран имеет неопределенную временную перспективу. Россия имеет развитую сырьевую экономику, поэтому доля углеродных источников энергии в структуре потребления будет еще долго занимать лидирующую позицию. Но при этом альтернативные «чистые» источники энергии, поддерживаемые политикой государства в области энергетики и новыми научными разработками, будут увеличивать свою долю в структуре баланса в ближайшем будущем.

Статья выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках Государственного задания на 2023 г. № 075-01590-23-05.

Список литературы

1. Прогноз развития энергетики мира и России – 2019. URL: <https://www.eriras.ru/data/994/rus> (дата обращения: 16.11.2023).
2. Распоряжение Правительства РФ от 09.06.2020 № 1523-р «Об Энергетической стратегии РФ на период до 2035 года». URL: <http://static.government.ru/media/files/w4sigFOiDjGVDYT4IgsApssm6mZRb7wx.pdf> (дата обращения: 16.11.2023).
3. Освоение новых регионов. URL: https://web.archive.org/web/20090529135904/http://n-dimitar.hit.bg/PROEKT_RU/New%20Ter.htm (дата обращения: 16.11.2023).
4. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии (курс лекций): учеб. пособие / сост. В.А. Агеев. Саранск, 2014. 184 с.
5. Пензинская ПЭС: состояние проекта и перспективы. URL: <https://fb.ru/article/385430/penjinskaya-pes-sostoyanie-proekta-i-perspektivy?ysclid=ln1liyw2yj803846777> (дата обращения: 16.11.2023).
6. Водородно-энергетический кластер на основе Пензинской ПЭС. URL: <https://h2ce.ru/projects/detail/vodorodno-energeticheskij-klaster-na-osnove-penzhinskoj-prilivnoj-elektrostantsii> (дата обращения: 16.11.2023).
7. Якутские бренды: к алмазам, углю и кино прибавится гелий. URL: <https://dzen.ru/a/ZQdpGwnGcxekBA9> (дата обращения: 16.11.2023).
8. Россия заполнит мир гелием. URL: <https://mashnews.ru/rossiya-zapolnit-mir-geliem.html> (дата обращения: 16.11.2023).
9. Охлаждение ядерных реакторов при помощи гелия. URL: <https://geliy.hermes-gas.ru/blog/ohlazhdenie-yadernyh-reaktorov-pri-pomoshchi-geliya?ysclid=lnabeg5xg8672270849> (дата обращения: 16.11.2023).
10. Для Якутии разрабатываются дирижабли с циклороторными двигателями. URL: <https://mashnews.ru/uleteli-no-obeshhhali-vernutya-dlya-yakutii-razrabatyvayut-dirizhablis-cziklo-rotornyimi-dvigatelyami.html> (дата обращения: 16.11.2023).
11. Альтернативные перспективы: ВУТ, ПГУ и синтетическое топливо. URL: <https://energosovet.ru> (дата обращения: 16.11.2023).

12. Зайденварт В.Е., Трубецкой К.Н., Мурко В.И., Нехороший И.Х. Производство и использование водоугольного топлива. М., 2001. 176 с.
13. Алексеев П.Н. Направления развития системы ядерной энергетики // Инноватика и экспертиза. 2016. № 3 (18). С. 67–80.
14. Торий в ядерной энергетике: плюсы, минусы, подводные камни. URL: <https://habr.com/ru/articles/382991> (дата обращения: 16.11.2023).
15. Альтернативная ториевая энергетика: малоизвестная, но реальная. URL: <https://dzen.ru/a/Y6qYVWDZP1a5Zzz5> (дата обращения: 16.11.2023).
16. ИТЭР – путь к новой энергетике. URL: <https://www.iter.org/ru> (дата обращения: 16.11.2023).
17. Термоядерную установку, у которой нет аналогов в мире, запустили в Курчатовском институте. URL: https://www.1tv.ru/news/2021-05-18/406680-termoyadernuyu_ustanovku_u_kotoroy_net_analogov_v_mire_zapustili_v_kurchatovskom_institute?ysclid=logyw4lqlm112450792 (дата обращения: 16.11.2023).
18. Постановление Правительства РФ от 16.03.2020 № 287 «Об утверждении Федеральной научно-технической программы развития синхротронных и нейтронных исследований и исследовательской инфраструктуры на 2019–2027 годы». URL: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/73698607/?ysclid=loi8a57v1m106472131> (дата обращения: 16.11.2023).
19. Технологии накопления энергии. URL: <https://sst.ru> (дата обращения: 16.11.2023).
20. Российские ученые изобрели накопители энергии на сверхпроводниках. URL: <https://newizv.ru/news/2023-02-28/est-proryv-rossiyskie-uchenye-izobreli-nakopiteli-energii-na-sverhprovodnikah-399014> (дата обращения: 16.11.2023).

References

1. *Prognоз развития энергетики мира и России – 2019* [Forecast of world and Russian energy development – 2019]. Available at: <https://www.eriras.ru/data/994/rus> (date of access: 16.11.2023).
2. *Rasporjazhenie Pravitel'stva RF ot 09.06.2020 № 1523-р «Ob Energeticheskoy strategii RF na period do 2035 goda»* [Decree of the Government of the Russian Federation dated 09.06.2020 №. 1523-р «On the Energy Strategy of the Russian Federation for the period up to 2035»]. Available at: <http://static.government.ru/media/files/w4sigFOiDjGVDYT4IgsApssm6mZRb7wx.pdf> (date of access: 16.11.2023).
3. *Osvoenie novykh regionov* [Development of new regions]. Available at: https://web.archive.org/web/20090529135904/http://n-dimitar.hit.bg/PROEKT_RU/New %20Ter.htm (date of access: 16.11.2023).
4. (2014) *Netraditsionnye i vozobnovlyayemye istochniki energii (kurs lektsiy): ucheb. Posobie. Sost. V.A. Ageev* [Non-traditional and renewable energy sources (course of lectures): studies manual. Comp. V.A. Ageev]. Saransk. 184 p.
5. *Penzhinskaya PES: sostoyanie proekta i perspektivy* [Penzhinskaya PES: project status and prospects]. Available at: <https://fb.ru/article/385430/penzhinskaya-pes-sostoyanie-proekta-i-perspektivi?ysclid=ln1liyw2yj803846777> (date of access: 16.11.2023).
6. *Vodorodno-energeticheskiy klaster na osnove Penzhinskoy PES* [Hydrogen-energy cluster based on the Penzhinskaya PES]. Available at: <https://h2ce.ru/projects/detail/vodorodno-energeticheskij-klaster-na-osnove-penzhinskoy-prilivnoj-elektrostantsii> (date of access: 16.11.2023).
7. *Yakutskie brendy: k almazam, uglyu i kino pribavitsya gelyi* [Yakut brands: helium will be added to diamonds, coal and cinema]. Available at: <https://dzen.ru/a/ZQdpGwnGcxekBA9> (date of access: 16.11.2023).
8. *Rossiya zapolnit mir gelyem* [Russia will fill the world with helium]. Available at: <https://mashnews.ru/rossiya-zapolnit-mir-geliem.html> (date of access: 16.11.2023).
9. *Okhlazhdenie yadernykh reaktorov pri pomoshchi gelyi* [Cooling of nuclear reactors with helium]. Available at: <https://gelyi.hermes-gas.ru/blog/okhlazhdenie-yadernyh-reaktorov-pri-pomoshchi-gelyi?ysclid=lnabeg5xg8672270849> (date of access: 16.11.2023).
10. *Dlya Yakutii razrabatyvayutsya dirizhabli s tsiklorotornymi dvigatelyami* [Airships with cyclorotor engines are being developed for Yakutia]. Available at: <https://mashnews.ru/uleteli-no-obeshhali-vernutysya-dlya-yakutii-razrabatyvayut-dirizhablis-cziklo-rotornyimi-dvigatelyami.html> (date of access: 16.11.2023).

11. *Al'ternativnye perspektivy: VUT, PGU i sinteticheskoe toplivo* [Alternative perspectives: VUT, PSU and synthetic fuel]. Available at: <https://energosovet.ru> (date of access: 16.11.2023).
12. Zaidenvarg V.E., Trubetskoy K.N., Murko V.I., Nekhoroshy I.H. (2001) *Proizvodstvo i ispol'zovanie vodougol'nogo topliva* [Production and use of coal-water fuel]. 176 p.
13. Alekseev P.N. (2016) *Napravleniya razvitiya sistemy yadernoy energetiki* [Directions of development of the nuclear power system] *Innovatika i ekspertiza* [Innovation and Expert Examination]. No. 3 (18). P. 67–80.
14. *Toriy v yadernoy energetike: plyusy, minusy, podvodnye kamni* [Thorium in nuclear power: pros, cons, pitfalls]. Available at: <https://habr.com/ru/articles/382991> (date of access: 16.11.2023).
15. *Al'ternativnaya torievaya energetika: maloizvestnaya, no real'naya* [Alternative thorium energy: little-known, but real]. Available at: <https://dzen.ru/a/Y6qYVWDZP1a5Zzz5> (date of access: 16.11.2023).
16. *ITER – put' k novoy energetike* [ITER – the path to new energy]. Available at: <https://www.iter.org/ru> (date of access: 16.11.2023).
17. *Termoyadernuyu ustanovku, u kotoroy net analogov v mire, zapustili v Kurchatovskom institute* [The thermonuclear plant, which has no analogues in the world, was launched at the Kurchatov Institute]. Available at: https://www.1tv.ru/news/2021-05-18/406680-termoyadernuyu_ustanovku_u_kotoroy_net_analogov_v_mire_zapustili_v_kurchatovskom_institute?ysclid=logyw4lqlml112450792 (date of access: 16.11.2023).
18. *Postanovlenie Pravitel'stva RF ot 16.03.2020 No. 287 «Ob utverzhdenii Federal'noy nauchno-tehnicheskoy programmy razvitiya sinkrotronnykh i neytronnykh issledovaniy i issledovatel'skoy infrastruktury na 2019–2027 gody»* [Decree of the Government of the Russian Federation No. 287 dated 16.03.2020 «On Approval of the Federal Scientific and Technical Program for the Development of Synchrotron and Neutron Research and Research Infrastructure for 2019–2027»]. Available at: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/73698607/?ysclid=loi8a57v1m106472131> (date of access: 16.11.2023).
19. *Tekhnologii nakopleniya energii* [Energy storage technologies]. Available at: <https://sst.ru> (date of access: 16.11.2023).
20. *Rossiyskie uchenye izobreli nakopiteli energii na sverkhprovodnikakh* [Russian scientists have invented energy storage on superconductors]. Available at: <https://newizv.ru/news/2023-02-28/est-proryv-rossiyskie-uchenye-izobreli-nakopiteli-energii-na-sverhpovodnikah-399014> (date of access: 16.11.2023).