

УДК 621.354 © В.Я. Афанасьев¹, В.М. Краев², А.И. Тихонов²,
Г.В. Серебрякова¹, 2024

UDC 621.354 © V.Ya. Afanasiev¹, V.M. Kraev², A.I. Tikhonov²,
G.V. Serebryakova¹, 2024

¹ Государственный университет управления, 109542, г. Москва, Россия

¹ State University of Management, Moscow, 109542, Russian Federation

² Московский авиационный институт, 125080, г. Москва, Россия

² Moscow Aviation Institute, Moscow, 125080, Russian Federation

✉ e-mail: vy_afanasyev@guu.ru

✉ e-mail: vy_afanasyev@guu.ru

Перспективные способы аккумулирования энергии

Prospective ways to store energy

DOI: <http://dx.doi.org/10.18796/0041-5790-2024-8-124-129>

АФАНАСЬЕВ В.Я.

Доктор экон. наук, профессор,
заведующий кафедрой
экономики и управления
в топливно-энергетическом комплексе
Государственного
университета управления,
109542, г. Москва, Россия,
e-mail: vy_afanasyev@guu.ru

КРАЕВ В.М.

Доктор техн. наук, доцент,
профессор кафедры № 512
Московского авиационного института,
125080, г. Москва, Россия,
e-mail: kraevvm@mail.ru

ТИХОНОВ А.И.

Канд. техн. наук, доцент,
заведующий кафедрой № 512
Московского авиационного института,
125080, г. Москва, Россия,
e-mail: mai512hr@mail.ru

СЕРЕБРЯКОВА Г.В.

Канд. экон. наук, доцент,
директор Института отраслевого
менеджмента Государственного
университета управления,
109542, г. Москва, Россия,
e-mail: gv_serebryakova@guu.ru

В статье рассмотрены перспективные способы аккумулирования энергии, выработанной за счет возобновляемых источников энергии (ВИЭ). Проведена оценка эффективности использования различного типа энергетических накопителей. Отмечается тенденция постепенного сокращения потребления угля во всем мире, что является предвестником перехода на более чистые виды энергии. Рассмотрены основные преимущества и недостатки источников энергии, таких как полезные ископаемые, солнечная, ветряная, геотермальная, гидроэнергетика, биомасса и энергия волн и приливов. Авторы предлагают активизировать экологически чистые процессы преобразования избытка электроэнергии в водород или метанол с дальнейшим их использованием в топливных элементах для выработки электроэнергии. Такие схемы позволяют получить максимальный коэффициент полезного действия современных энергетических установок.

Ключевые слова: аккумулирование энергии, энергетические накопители, источники энергии, экологически чистые процессы.

Для цитирования: Перспективные способы аккумулирования энергии / В.Я. Афанасьев, В.М. Краев, А.И. Тихонов и др. // Уголь. 2024;(8):124-129. DOI: 10.18796/0041-5790-2024-8-124-129.

Abstract

The article discusses prospective ways of accumulating energy generated using the renewable energy sources. The efficiency of using different types of energy storage devices is assessed. The tendency of gradual decrease of coal consumption all over the world is noted, which is an indication of transition to cleaner types of energy sources. The main advantages and disadvantages are reviewed for such energy sources as minerals, solar, wind, geothermal and hydro power, biomass as well as the wave and tidal energy. The authors suggest to enhance environmentally friendly processes of using the excessive electrical energy into production of hydrogen or methanol, with their subsequent use in fuel cells for power generation. Such solutions can maximise the efficiency of currently existing power plants.

Keywords

Energy accumulation, energy storages, energy sources, environmentally friendly processes.

For citation

Afanasiev V.Ya., Kraev V.M., Tikhonov A.I., Serebryakova G.V. Prospective ways to store energy. *Ugol'*. 2024;(8):124-129. (In Russ.). DOI: 10.18796/0041-5790-2024-8-124-129.

ВВЕДЕНИЕ

Исследование эффективности использования энергетических ресурсов и их накопителей в различных энергосистемах, таких как промышленные предприятия и жилой сектор, является актуальной и важной задачей в современном мире. Этот вопрос обсуждается в множестве статей, проектов и исследований, однако практическая реализация этого метода остается ограниченной из-за высокой стоимости их внедрения. В данной статье предлагается рассмотреть преимущество полезных ископаемых, таких, как уголь, а также перспективные способы аккумулирования энергии, выработанной посредством ВИЭ. Предложенный подход позволит помочь оценить эффективность использования различного типа энергетических накопителей в разных энергосистемах. Потребление электроэнергии является непостоянным во времени как в течение суток, так и в течение года. Мощность нагрузки меняется в зависимости от технологических процессов, расписания работы предприятий, времени суток и просто желаний людей использовать электроприборы.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

В последнюю четверть века для многих стран Европы экологическая политика стала важной частью государственной стратегии и законодательства. К сожалению, такой подход связан с отказом от углеводородной энергетики и приводит к росту стоимости электроэнергии для потребителей.

Экологический подход для России также является актуальным. Это связано с потребностью защиты окружающей среды, снижения эмиссий парниковых газов и обеспечения устойчивого развития для будущих поколений. Однако рыночный рост цен на энергоресурсы в мире может вызывать определенные опасения и споры относительно эффективности экологических политик и их влияния на экономическую устойчивость. Возрастающие цены на энергоресурсы могут привести к повышению стоимости электроэнергии и других видов энергии для потребителей, что, в свою очередь, может сказываться на экономическом благополучии и жизненном уровне населения. Этот конфликт интересов между экологией и экономикой обуславливает необходимость разработки и внедрения более эффективных и инновационных подходов к использованию ВИЭ и энергосбережению. Это может включать в себя улучшение энергоэффективности зданий и промышленных объектов, развитие инфраструктуры для возобновляемых источников энергии, а также стимулирование использования альтернативных технологий и перехода на децентрализованные энергосистемы.

Конференция ООН по климату (COP26) 2021 г., учитывая текущие условия, пришла к выводу о необходимости уточнения формулировки итогового соглашения, включая упоминание о потреблении угля. В итоге, финальный

документ указывает на договоренность о «постепенном сокращении» потребления угля, а не «прекращении» его использования, как это было предложено ранее [1].

Возобновляемая энергия, также известная как регенеративная или «зеленая» энергия, представляет собой вид энергии, который получается из источников, которые восстанавливаются или постоянно обновляются на естественных масштабах человеческой деятельности. Однако в отличие от природных углеводородных энергоносителей ВИЭ требуют существенных инвестиций для ее создания. ВИЭ включают в себя солнечную, ветряную, гидроэнергетику, геотермальную, биомассу и энергию волн и приливов. Стоит отметить, что основой всех процессов, формирующих ВИЭ, является всего один процесс – термоядерная реакция Солнца.

В России производство электроэнергии в основном приходится на теплоэлектростанции (ТЭС), меньшую долю составляют гидро- (ГЭС) и атомные (АЭС) электростанции. Также небольшую долю в производстве электроэнергии занимают возобновляемые источники, такие как ветровые (ВЭС) и солнечные (СЭС) электростанции. Доля ветро- и солнечной энергетики в России составляет менее одного процента. Это обусловлено дешевизной традиционных источников энергии. Если отнести к ВИЭ также и гидроэнергетику, то их доля составит, по данным Росстата, более 15%.

В Европе типы выработки электроэнергии существенно отличаются по странам. Совет Европейского Союза принял новую Директиву, касающуюся возобновляемых источников энергии. Целью Директивы является увеличение доли возобновляемых источников энергии в общем энергопотреблении ЕС до 42,5% к 2030 г. с дополнительным индикативным увеличением на 2,5% для достижения целевого уровня 45% [2]. Эта Директива, являясь частью пакета мер «Fit for 55», направлена на достижение более строгих климатических целей ЕС, включая сокращение выбросов парниковых газов на 55% к 2030 г. В результате, государствам-членам предоставляется 18 месяцев для внедрения этой директивы в национальное законодательство, что заменяет предыдущую директиву с целевым показателем использования возобновляемых источников энергии в 32% к 2030 г.

В 2022 г. доля ветряных и солнечных энергетических ресурсов в мировом энергобалансе увеличилась до 12%, что означает прогресс в переходе к более чистым и устойчивым источникам энергии. Тем не менее они по-прежнему значительно уступают ископаемым видам энергии, показывая на необходимость применения усилий по развитию и внедрению возобновляемых источников энергии в мировой экономике.

Одними из бурно развивающихся видов ВИЭ можно выделить солнечные и ветряные системы. В отличие от гидроэнергетики они не привязаны к конкретной локации на водоеме, а по сравнению с биоэнергетикой – не требуют промежуточных биологических процессов массообмена.

Однако возобновляемые источники энергии, такие как солнечные и ветряные установки, обладают существенным недостатком. Они могут иметь ограниченную способность накопить энергию на продолжительное время

из-за варьирующихся погодных условий. Для солнечных установок определяющим является, как минимум, цикл солнечной активности в течение дня при безоблачной погоде. Для ветроэнергетики требуется устойчивый воздушный поток со скоростью в определенном диапазоне. Как низкая, так и высокая скорость ветра неприемлемы для ветроустановок. Обледенение также делает их эксплуатацию невозможной. Таким образом, налицо два процесса – переменные по времени суток и года энергопотребления. Причем это независимые процессы колебательного вида с разными периодами и амплитудами. Это приводит к необходимости поддержания резервных мощностей на основе ископаемых топлив, таких как уголь и природный газ. Такой подход, в свою очередь, увеличивает затраты на электроэнергию и делает ее стоимость недоступной для широких слоев населения, промышленности и сельского хозяйства.

Оптимальный график производства электроэнергии для разных видов электростанций имеет свои особенности. Для тепловых электростанций, ГЭС и АЭС график производства электроэнергии может быть равномерным. Это позволяет включить необходимое количество генераторных установок в режим максимального коэффициента полезного действия (КПД).

В то время как для ветровых и солнечных электростанций, задача совмещения режимов производства электроэнергии и ее потребления более сложная. Это связано с неравномерностью и стохастичностью мощности нагрузки, а также зависимостью работы генераторов от непостоянных погодных условий. В этом контексте использование накопителей энергии становится актуальным и необходимым для обеспечения стабильности и устойчивости энергосистем, особенно при объединении возобновляемых источников энергии с традиционными электростанциями в единую энергетическую систему.

Накопители энергии позволяют компенсировать изменения в поставке электроэнергии от возобновляемых источников и поддерживать стабильность сети. Стоит отметить, что энергосистемы, использующие природное углеводородное топливо, такое как уголь и газ, не требуют создания таких накопителей, поскольку процесс выработки энергии полностью управляем в необходимых для потребителя объемах.

Недостатками использования генераторов ВИЭ являются низкий КПД и излишний перевод энергии первичного источника, такого как топливо для ТЭС и АЭС, в тепло. Это может приводить к потере части энергии и рассеиванию тепла в окружающую среду. В то же время использование тепловой энергии для систем отопления и горячего водоснабжения повышает эффективность использования топлива, но все еще остается проблема неполного преобразования энергии.

Для снижения вредного воздействия на окружающую среду и повышения энергетической эффективности необходимо развивать технологии и системы, которые смогут оптимизировать преобразование энергии и минимизировать потери. ТЭС и АЭС вырабатывают энергию в соответствии с потребностями потребителей, и потери энергии существенно меньше по сравнению с ВИЭ. Таким образом,

оптимизация графика производства электроэнергии на ветровых и солнечных электростанциях требует инноваций и интеграции с другими видами энергии.

Для ГЭС водохранилище играет роль накопителя энергии, но с точки зрения системы преобразования энергии этот накопитель следует рассматривать более как резервуар первичного источника энергии, подобно топливу в ТЭС. Такие внешние условия работы систем ВИЭ приводят к необходимости создания аккумулирующих установок большой мощности. Эти установки должны удовлетворять ряду требований: компактность, безопасность, высокая экономическая эффективность.

В документах ЕС есть интересное, но спорное решение для процесса аккумулирования энергии ВИЭ. Европейские официальные лица предлагают использовать электрические Li-Ion аккумуляторы. Стоит обратить внимание на мощность аккумулирующих систем, которые указаны в отчете ЕС [3]. В системе 100% возобновляемой энергетики аккумуляторы могли бы обеспечивать до 24% потребностей Европы в электроэнергии. Для этого распределенная установленная мощность должна достичь 900 ГВт/ч к 2030 г. и 1600 ГВт/ч к 2050 г. Авторы приводят в качестве примера проекты компании «Northvolt», производящей аккумуляторные батареи.

Странным является тот факт, что европейские специалисты не предлагают других, более эффективных способов аккумулирования электроэнергии от ВИЭ. Проведенные исследования эффективности аккумуляторных батарей [4] показали, что КПД не превышает 80%, причем их емкость сильно снижается с циклами эксплуатации. Например, после 500 циклов факт снижения емкости следует учитывать, а после 2500 циклов емкость снижается почти в два раза. Для формирования аккумулирующих систем ВИЭ такие особенности представляют существенный недостаток. Более того, для ВИЭ, основанных на использовании солнечного излучения, имеющего суточный цикл активности, применение таких аккумуляторов нецелесообразно.

Однако реализация аккумуляторов энергии сталкивается с рядом препятствий, главным из которых является высокая стоимость установок по сравнению с получаемым положительным эффектом. Для популяризации и распространения данного подхода необходимо продолжать развивать и совершенствовать технологии накопителей энергии, снижая их стоимость и улучшая эффективность.

Напрашивается вопрос, почему европейские коллеги не обратили внимание на другие способы аккумулирования электроэнергии? Как вариант можно предложить экологически чистые процессы преобразования избытка электроэнергии в водород или метанол, а в дальнейшем, использование водорода или метанола в топливных элементах для выработки электроэнергии.

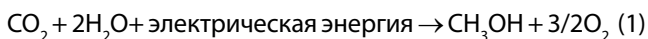
Водородная энергетика предлагается как альтернатива для решения проблем накопления и использования энергии. Однако этот подход столкнется с рядом экономических и технических трудностей, таких как производство водорода, его транспортировка и хранение. Несмотря на то, что водородная энергетика может принести экологические и социальные локальные преимущества, она будет всегда дороже ввиду специфических свойств водорода,

что может затруднить ее широкое внедрение. Более подробно эти особенности водорода мы рассматривали в статье [5].

Для массового применения водородных хранилищ стоимость таковых должна быть минимальна. Возможно использование подземных газовых емкостей, однако сразу же возникает вопрос транспортировки водорода от места его выработки ВИЭ к месту хранения. Хранение водорода как под высоким давлением, так и в жидкой фазе существенно удорожает проекты. Сам процесс ожижения водорода является затратным, и на него расходуется около 25% газообразного водорода [6]. С точки зрения безопасности безопасное обращение с водородом требует больше затрат. Сама водородная инфраструктура требует изоляции паров водорода от окислителя, требуется запорно-регулирующая арматура, специально предназначенная для водорода.

Как альтернативу водороду в качестве носителя химической энергии можно предложить метанол (CH_3OH) – простейший органический спирт. Это перспективное топливо для энергетических систем будущего благодаря высокой плотности энергии, простоте производства из ВИЭ или биомассы, а также удобству хранения и транспортировки. В нормальных условиях метанол представляет собой жидкость с плотностью немногим меньше плотности воды. Литр метанола содержит гораздо больше энергии, чем литр газообразного водорода. В то же время, метанол на несколько порядков безопаснее.

Метанол также может быть получен из CO_2 путем каталитического гидрирования CO_2 с H_2 , где водород был получен в результате электролиза воды. Этот процесс используется компанией Carbon Recycling International (CRI) из Исландии, которая разработала технологию, предназначенную для производства возобновляемого метанола, также известного как e-метанол, из диоксида углерода и водорода с использованием электролиза воды или, в качестве альтернативы, водорода, выделяемого из промышленных отходящих газов. По сути, метанол является рабочим телом для накопления энергии в легко транспортируемом виде. Метанол непосредственно получают из водорода и углекислого газа вместо того, чтобы пытаться накапливать энергию в свободном водороде [7].



Метанол, производимый CRI, имеет торговую марку Vulcanol. В 2011 г. CRI стала первой компанией, производящей и продающей жидкое возобновляемое транспортное топливо, произведенное с использованием только углекислого газа, воды и электроэнергии из возобновляемых источников.

В Китае исследовательская группа во главе с проф. Ли Джаном из Даляньского академического института химической физики (DICP) начала «демонстрационный проект по производству жидкого солнечного топлива». Ученые использовали фотоэлектрическую солнечную электростанцию мощностью 10 МВт для выработки электроэнергии, щелочной электролиз воды с катализатором собственной разработки для производства возобновляемого водорода и катализатор гидрирования диоксида углерода для про-

изводства конечного продукта – метанола, который они назвали «жидким солнечным светом». Это новый способ крупномасштабного производства экологически чистого жидкого топлива с использованием ВИЭ [8].

Метанол, произведенный на заводе, можно поставлять для химической промышленности или хранить и снова использовать для производства водорода. Также метанол может быть использован как топливо для двигателей внутреннего сгорания.

Поскольку одним из важнейших критериев для оценки принципа системы аккумулирования энергии ВИЭ является ее эффективность, проведем анализ потерь. В рассматриваемом процессе потери – это выработка рабочего тела, его преобразование для хранения, хранение, преобразование в электроэнергию. Они определяются как теоретическими параметрами циклов, так и технологическими. К технологическим мы относим несовершенства технологий, которые в дальнейшем могут быть снижены.

Рассмотрим процессы производства водорода и метанола путем электролиза. В настоящее время эффективность производства водорода путем электролиза электроэнергии водой составляет от 75 до 85% [14] с потенциалом до 93% до 2030 г. [9].

Метанол, который получают из CO_2 и воды с использованием электричества, называется e-метанолом. Обычно водород получают путем электролиза воды, которая затем преобразуется с помощью CO_2 в метанол. Эффективность синтеза метанола из водорода и диоксида углерода в настоящее время составляет 80%. Таким образом, эффективность производства метанола из электричества и диоксида углерода составляет от 59 до 78%. Если CO_2 доступен не напрямую, а получается прямым улавливанием воздуха, то эффективность производства метанола с использованием электроэнергии составляет 50-60% [10].

Если отводимое тепло используется для высокотемпературного электролиза, синтеза метанола и/или топливного элемента, то общая эффективность может быть значительно повышена помимо электрической. Например, общая эффективность в 86% может быть достигнута за счет использования отходящего тепла (например, для централизованного теплоснабжения), которое получается при производстве электронного метанола электролизом [11].

Как мы уже писали выше, хранение водорода является достаточно сложным и затратным процессом. В подземных хранилищах природного газа давление – 6-10 бар. Даже при сжатии водорода до 700 бар его объемная плотность энергии составляет 5,6 МДж/л, тогда как у бензина это 32 МДж/л. При давлении 10 бар, как в подземном хранилище, плотность водорода – 0,87 кг/м³, что соответствует энергосодержанию 105 МДж/м³. Природный газ при давлении 10 бар содержит в кубометре около 340 МДж. Т.е. при переходе на водород емкость подземных хранилищ надо увеличить в три раза. Для ВИЭ необходимо сформулировать требование по автономности системы, т.е. ее независимости от удаленных систем хранения водорода. Следует вывод, что применение подземных хранилищ газообразного водорода рекомендовано исключить. Тогда остаются варианты хранения водорода в газообразном виде под высоким (до 700 бар) давлением или в жидком виде при

температуре ниже 20К. Для малых объемов, равных емкости бака водородных автомобилей, целесообразно хранить в газообразном виде под давлением. Однако для больших емкостей такой способ нецелесообразен из-за высокой их стоимости. Для давления 700 бар требуются специальные, особо прочные композитные баллоны небольшого объема. Такие баллоны используются в водородных автомобилях. В обычных стальных баллонах водород хранится при давлении до 200 бар, и их применение неоправданно.

Остается вариант хранения в жидком виде, который широко используется в настоящее время при транспортировке водорода. Сжиженный водород имеет плотность 70,8 кг/м³, что почти в два раза больше, чем у водорода при давлении 700 бар (42 кг/м³). Хотя минимальная теоретическая энергия для сжижения H₂ в условиях окружающей среды составляет 3,3-3,9 кВт·ч/кг, фактические потребности в энергии для сжижения значительно выше – по меньшей мере 10-13 кВт·ч/кг в зависимости от объема операции сжижения, исходной температуры водорода и других факторов. Для справки: 10-13 кВт·ч/кг составляет около 30-39% от энергосодержания килограмма водорода [12].

Для сравнения, метанол представляет собой жидкость при стандартных условиях. Т.е. преобразование рабочего тела после его выработки для хранения не требуется. Хранение жидкого водорода связано с неизбежными и довольно значительными потерями из-за его испарения:

до ~0,4% в день для резервуаров объемом 50 м³, 0,2% в день для резервуаров объемом 100 м³, до 0,06% в день для резервуаров объемом 20000 м³, т.е. потери можно снизить, используя резервуары большого объема. При однократном захлаживании в автоцистернах теряется до 15% водорода.

Метанол хранится в специальных металлических цистернах или бочках, а химически чистый – в стеклянных емкостях. Согласно Приказу Минфина России, возможны потери до 0,1% в месяц или 0,0033% в день. Для сравнения, у водорода этот показатель составляет 0,2-0,4%, что в десять раз больше, чем у метанола. На рис. 1 приведено сравнение потерь рабочего тела в течение одного месяца. Очевидно, что потери водорода несравнимо выше.

Далее рассмотрим обратное преобразование рабочих тел в электроэнергию посредством топливных элементов (ячеек). В топливных ячейках происходит реакция, обратная электролизу с выработкой электроэнергии. Теоретический КПД водородных ячеек составляет 85% [13]. Реальный КПД также достаточно высок – более 60% и имеет тенденцию к повышению по мере совершенствования технологий. Теоретическая термодинамическая эффективность преобразования энергии «прямого метанолового топливного элемента» (Direct methanol fuel cells – DMFC) составляет 97% [14]. DMFC отличаются высокой эффективностью, а реальный КПД некоторых типов топливных элементов достигает 60% и более [15].

Эффективность процессов преобразования рабочих тел – водорода и метанола – представлена на рис. 2. Видно, что КПД водорода выше при его обратном преобразовании в электроэнергию, однако на сжижение водорода требуется значительная его доля. Метанол же не требует такого процесса, поскольку является жидкостью.

При использовании отработанного тепла топливного элемента может быть достигнут КПД топливного элемента от 85 до 90%. [16]. Отработанное тепло может использоваться для обогрева самой установки ВИЭ. При широком использовании отходящего тепла может быть достигнута общая эффективность производства электронного метанола от 70 до 80%, включая последующее использование электронного метанола в топливном элементе.

На рис. 3 представлены суммарные потери при использовании водорода и метанола в качестве рабочего тела для аккумулирования энергии с ВИЭ в течение месяца.

Стоит обратить внимание на то, что время хранения существенно влияет на эффективность системы с использованием водорода. Например, за один месяц хранения водород теряет около 10% своего объема, а итоговый КПД составит примерно 5% (см. рис. 3). Метанол обладает меньшими потерями, и итоговый КПД составит около 40% с достаточно продолжительным сроком хранения.

Выводы

ВИЭ в России и во всем мире будут продолжать развиваться, поскольку они обеспечивают эффективное решение энергетических потребностей в изолированных регионах. Одним из важных компонентов ВИЭ может стать система аккумулирования вырабатываемой энергии, когда она не требуется потребителю. В традиционной угольной и газовой энергетике такая проблема отсутствует.

Суммарные потери на аккумулировании энергии, %

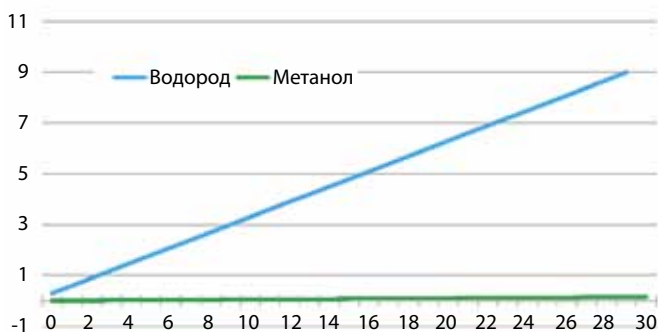


Рис. 1. Потери рабочего тела в течение одного месяца

Fig. 1. Losses of the working medium within one month

Эффективность процессов (КПД) при накоплении энергии на преобразование рабочего тела



Рис. 2. Эффективность процессов преобразования водорода и метанола при накоплении энергии

Fig. 2. Efficiency of the hydrogen and methanol conversion processes for energy storage



Рис. 3. Суммарные потери при использовании водорода и метанола в качестве рабочего тела для аккумуляции энергии с ВИЭ

Fig. 3. Total losses when using hydrogen and methanol as a working medium to store energy generated using the renewable energy sources

В исследовании проведен анализ эффективности различных способов накопления энергии. Полученные результаты показали, что наиболее эффективным является использование метанола в качестве рабочего тела. КПД при его электролизе несущественно ниже КПД производства водорода, его также можно отнести к «зеленым» видам энергоносителей, а потери при его хранении несоизмеримо ниже, чем у водорода. Оптимальным решением для установок ВИЭ будет использование в качестве аккумуляторов энергии системы с генерацией метанола и последующим его преобразованием обратно в электроэнергию.

Список литературы • References

- Glasgow Climate Pact Decision. (2021). [Electronic resource]. Available at: https://unfccc.int/sites/default/files/resource/cma3_auv_2_cover%20decision.pdf (accessed 15.07.2024).
- DIRECTIVE (EU) 2023/2413 of the European Parliament and of the Council. (2023). [Electronic resource]. Available at: <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2023/2413/oj> (accessed 15.07.2024).
- Final synthesis report. EU's Global Leadership in Renewables. European Commission, B-1049 Brussels. (2021). [Electronic resource]. Available at: <https://www.apren.pt/contents/publicationsothers/eu-global-leadership-in-renewables.pdf> (accessed 15.07.2024).
- Клименко Г.К., Сорокин М.И. Исследование энергетических характеристик аккумуляторов специального назначения // Инженерный журнал: Наука и инновации. 2014. № 2 (26). С. 9-20. Klimenko G.K., Sorokin M.I. Investigation of the energy characteristics of special purpose batteries. *Inzhenernyj zhurnal: nauka i innovatsii*. 2014;(2):9-20. (In Russ.).
- Kraev V.M., Tikhonov A.I. Prospects for hydrogen power in Europe (2023). *Russian Engineering Research*. 2023;43(5):618-620.
- Системы хранения водорода / О.К. Алексеева, С.И. Козлов, Р.О. Самсонов и др. // Транспорт на альтернативном топливе. 2009. № 5(11). С. 72-79. Alekseyeva O.K., Kozlov S.I., Samsonov R.O., Fateyev V.N. Hydrogen storage systems. *Transport na alternativnom toplive*. 2009;5(11): 72-79. (In Russ.).
- Emissions-to-Liquids Technology. (2018). [Electronic resource]. Available at: <https://web.archive.org/web/20181026025112/http://carbonrecycling.is/innovation1/> (accessed 15.07.2024).
- Dalian Institute of Chemical Physics, Chinese Academy of Sciences. (2020). [Electronic resource]. Available at: <https://english.dicp.cas.cn> (accessed 15.07.2024).
- Methanol as an alternative fuel for vessels. Maritime Knowledge Centre, TNO and TU Delft Public final report. (2018). [Electronic resource]. Available at: https://sustainableworldports.org/wp-content/uploads/MKC-TNO-and-TU-Delft_2018_Methanol-as-an-alternative-fuel-for-vessels-report.pdf (accessed 15.07.2024).
- Bos M.J., Kersten S.R., Brilman D.W. (2020). Wind Power to Methanol: Renewable Methanol Production Using Electricity, Electrolysis of Water and CO₂ Air Capture. *Applied Energy*, 264, Article 114672. [Electronic resource]. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.114672> (accessed 15.07.2024).
- Highly Efficient Hydrogen Production Using Solid Oxide Electrolysis Integrated with Renewable Heat and Power. CORDIS (2021). [Электронный ресурс]. URL: https://cordis.europa.eu/programme/id/H2020_FCH-02-2-2020 (accessed 15.07.2024).
- Clausen R., Houbak N., Elmegaard B. Technoeconomic Analysis of a Methanol Plant Based on Gasification of Biomass and Electrolysis of Water. *Energy*. 2010;35(5):2338-2347.
- Hendra I Nurdin, Benmouna Amel, Bin Zhu. Maximum efficiency points of a proton-exchange membrane fuel cell system: Theory and experiments. *Applied Energy*. 2024;35(9):138-147.
- Umit B. Demirci. Direct liquid-feed fuel cells: Thermodynamic and environmental concerns. *Journal of Power Sources*. 2007;16(9): 236-242.
- Romero-Pascual E., Soler J. Modelling of an HTPeM-based Micro-combined Heat and Power Fuel Cell System with Methanol. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2014;39(8):4053-4059.
- Arsalis Alexandros, Nielsen Mads. Modeling and Off-design Performance of a 1 kWe HT-PEMFC (High Temperature-Proton Exchange Membrane Fuel Cell)-based Residential Micro-CHP System for Danish Single-family Households. *Energy*. 2011;(2):993-1002.

Authors Information

Afanasyev V.Ya. – Doctor of Economic Sciences, Professor, Head of the Department of Economics and Management in the Fuel and Energy Sector, State University of Management, Moscow, 109542, Russian Federation, e-mail: vy_afanasyev@guu.ru

Kraev V.M. – Doctor of Engineering Sciences, Associate Professor, Professor of the Department № 512, Moscow Aviation Institute, Moscow, 125080, Russian Federation, e-mail: kraevvm@mail.ru

Tikhonov A.I. – PhD (Engineering), Associate Professor, Head of the Department No. 512, Moscow Aviation Institute, Moscow, 125080, Russian Federation, e-mail: mai512hr@mail.ru

Serebryakova G.V. – PhD (Economic), Associate Professor, Director, Industry Management Institute, State University of Management, Moscow, 109542, Russian Federation, e-mail: gv_serebryakova@guu.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию: 8.06.2024

Поступила после рецензирования: 15.07.2024

Принята к публикации: 26.07.2024

Paper info

Received June 8, 2024

Reviewed July 15, 2024

Accepted July 26, 2024