

Топливные элементы и водородная энергетика

Fuel cells and hydrogen energy

Сергей ФИЛИППОВ

Директор Института энергетических исследований (ИНЭИ) РАН, д. т. н.
e-mail: fil_sp@mail.ru

Андрей ГОЛОДНИЦКИЙ

Заместитель генерального директора – главный конструктор, «Инэнэрджи», к. т. н.
e-mail: a.golodnitsky@inenergy.ru

Алексей КАШИН

Председатель Совета директоров «Инэнэрджи»
e-mail: a.kashin@inenergy.ru

Sergey FILIPPOV

D. Eng. Sc., Director of the Energy research institute of the RAS
e-mail: fil_sp@mail.ru

Andrey GOLODNITSKY

CES, Deputy General Director – Chief Designer, Inenergy
e-mail: a.golodnitsky@inenergy.ru

Aleksey KASHIN

Chair of the board, Inenergy
e-mail: a.kashin@inenergy.ru

Новый водородный топливный элемент Toyota Mirai

Источник: SergioYoneda / Depositphotos.com



Аннотация. Статья содержит большой аналитический материал, посвященный использованию водорода в топливных элементах. Авторы подробно описывают виды топливных элементов, преимущества использования и условия эксплуатации каждого из них. Особое внимание в статье уделяется возможностям создания производства и массового применения топливных элементов в России.

Ключевые слова: водород, топливные элементы, производство энергии, энергетическая установка.

Abstract. The article contains a large analytical material on the use of hydrogen in fuel cells. The authors describe in detail the types of fuel cells, the benefits of use and the operating conditions of each of them. Particular attention in the article is paid to the possibilities of setting up production and mass use of fuel cells in Russia.

Keywords: hydrogen, fuel cells, energy production, power plant.

II

Производство «голубого» водорода из природного газа должно сопровождаться утилизацией CO₂, что резко увеличивает стоимость водорода

В последние годы, на фоне набирающей обороты политики по декарбонизации мировой экономики, вновь возродился интерес к водородной энергетике [1]. Предыдущий всплеск интереса к водороду отмечался около 20 лет назад и был связан с разработкой концепции экологически чистой энергетики [2,3]. Однако в настоящее время намерения выглядят более целенаправленными. Ряд стран разработали соответствующие программы, в частности, Германия, Япония, Южная Корея. В основном это страны – крупные импортеры природного газа. Переход на использование водорода рассматривается ими в качестве одного из основных мероприятий по сокращению выбросов парниковых газов, наряду с развитием возобновляемой энергетики. При этом предполагается, что возобновляемые источники энергии (ВИЭ) станут основной базой для производства водорода.

Рисуются радужные перспективы наращивания объемов потребления водорода в мире. Например, в прогнозе Bloomberg



PowerCell Sweden AB PEM Fuel Cell FCS-48GF series
Источник: Ritmindustry.com

NEF [4] потребление водорода к 2050 году может вырасти до 700 млн тонн в год, что в 6 раз выше нынешнего уровня. Это составит 24 % от величины конечного потребления энергии в мире. Предполагается, что прирост спроса на водород будет происходить в основном за счет транспорта и электроэнергетики. Теоретически возможным объемом мирового потребления водорода к 2050 году называется величина 1,37 млрд тонн в год или 49 % от мировых потребностей в конечной энергии к этому времени [4].

Энергетической стратегией России до 2035 года предусматривается обеспечение экспорта водорода в объеме 0,2 млн



Резервуары для хранения Linde group, Schiedam-8228

Источник: Wikimedia.org

тонн в 2024 году и 2 млн тонн в 2035 году. Это амбициозные значения, если учесть, что относительно определенные экспортные перспективы есть только у «зеленого» водорода, получаемого электролизом воды за счет электроэнергии от ВИЭ. Для обеспечения приемлемой стоимости такого водорода нужны высококачественные ресурсы ВИЭ. Такие ресурсы в России, как правило, расположены в отдаленных регионах (например, высококачественными являются ресурсы ветра на побережье арктических и дальневосточных морей) и трудны для практического использования в больших масштабах. Производство «голубого» водорода из природного газа должно сопровождаться утилизацией попутно получаемого CO_2 , что резко увеличивает стоимость водорода. Нет никакой уверенности, что страны – потенциальные импортеры водорода, например, Германия или Япония согласятся приобретать «коричневый» водород, производимый за счет электроэнергии АЭС.

Главное достоинство перехода на водород – это исключение эмиссии в атмосферу углекислого газа. Конечно, если ее не будет при производстве водорода. Кроме того, экологическая чистота водорода делает его привлекательным для покрытия энергетических нужд мегаполисов и крупных

городов с высоким удельным энергопотреблением на единицу площади. Наконец, водород может оказаться экономически привлекательным энергоносителем для использования в мобильной (транспортной) энергетике, где он выступает прямым конкурентом для электротранспорта и традиционных двигателей внутреннего сгорания.

Нужно отметить, что замещение водородом природного газа в традиционных машинных технологиях – паровых и газовых турбоустановках не приведет к каким-то значимым положительным эффектам. КПД энергоустановок останется тем же. Он определяется величиной термодинамических параметров установки и уровнем ее

Теоретически возможным объемом мирового потребления водорода к 2050 году называется величина 1,37 млрд тонн в год или 49% от мировых потребностей в конечной энергии к этому времени

Единственной технологией, оправдывающей переход на водород с энергетической и экономической точки зрения, являются топливные элементы. Их активные разработки идут в Японии, Южной Корее, США

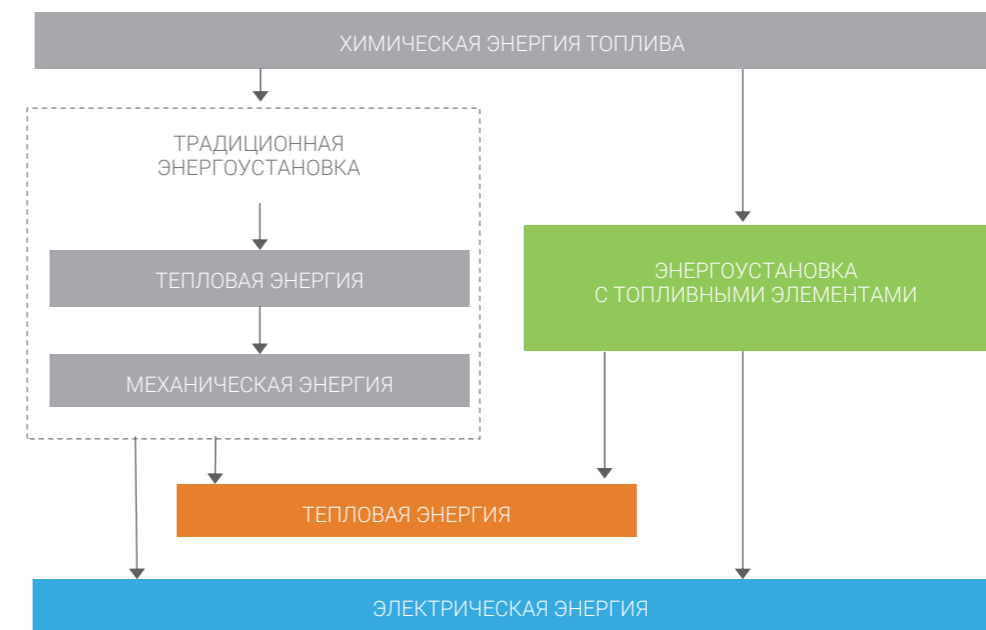
технического совершенствования. Но себестоимость производства электроэнергии возрастет, поскольку стоимость водорода в несколько раз выше по сравнению с природным газом. Останется той же проблема контроля образования оксидов азота при сжигании топлива. Правда, не будет выбросов углекислого газа, полиароматики и других углеродсодержащих вредных веществ. Но и при сжигании природного газа уже давно научились успешно с ними бороться.

Единственной технологией, оправдывающей переход к водородной энергетике с энергетической и экономической точки зрения, являются топливные элементы. Не зря ключевым элементом национальной водородной стратегии Германии яв-

ляется многомиллиардная «Национальная инновационная программа в области технологий водородных и топливных элементов» [5]. Еще раньше активные разработки топливных элементов были начаты в Японии, Южной Корее, США. В Японии и Южной Корее при активной государственной поддержке создаются демонстрационные зоны, целью которых являются, во-первых, отработка технологии в реальных условиях эксплуатации и, во-вторых, демонстрация возможностей технологии для ускорения формирования соответствующего рынка. По этому же пути идет Германия, где начинают создаваться «водородные регионы» (HyLands), призванные ускорить разработку и рыночное внедрение топливных элементов и других «водородных» технологий.

Топливные элементы или, по-другому, электрохимические генераторы – это безмашинная технология прямого преобразования химической энергии топлива в электрическую энергию, то есть в одну стадию (рисунок 1). В них отсутствуют движущиеся части. Главными конкурентными преимуществами энергетических установок с топливными элементами являются их высокая энергетическая эффективность, надежность, почти полное отсутствие вредных выбросов и бесшумность. Практически нет значимых ограничений для их размещения непосредственно у потребителей.

Рис. 1. Схема преобразования химической энергии топлива в электроэнергию в традиционных энергоустановках и в топливных элементах

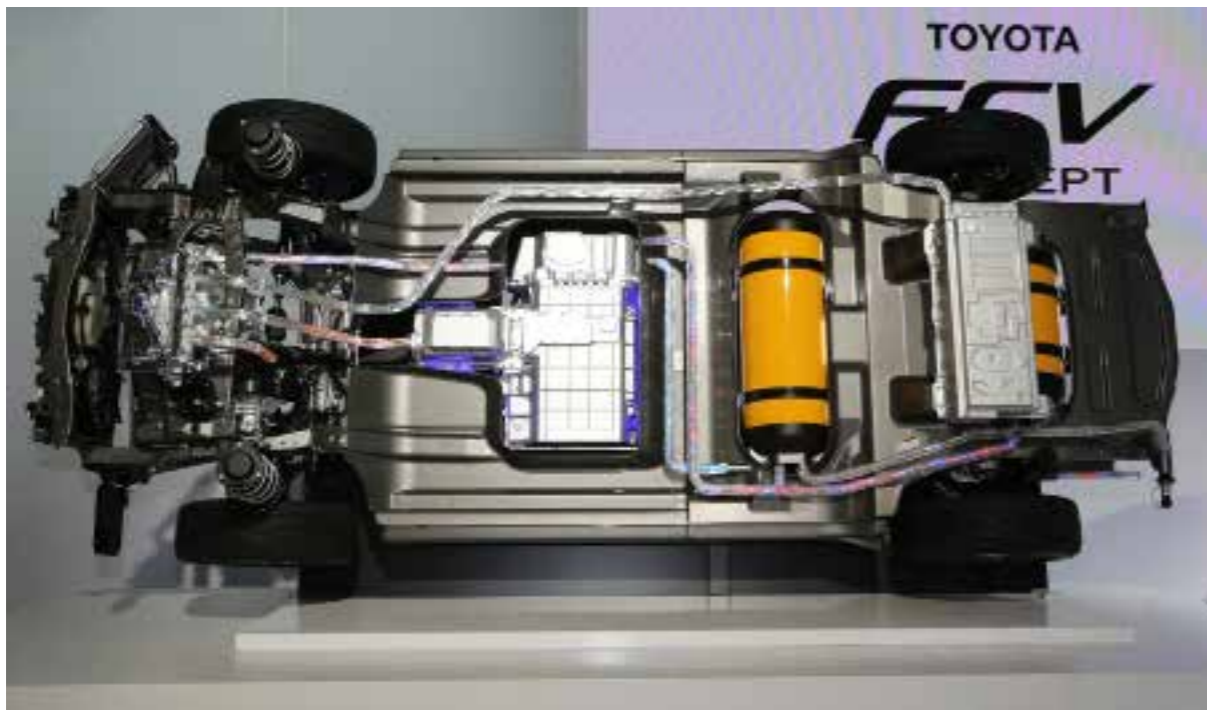


Потому это наиболее перспективная технология для распределенной генерации.

В традиционных энергоустановках, как известно, имеется несколько промежуточных стадий преобразования энергии с соответствующими преобразователями и потерями. Сначала химическая энергия топлива превращается в тепловую энергию рабочего тела (паровой котел, камера сгорания), затем тепловая энергия преобразуется в механическую (турбина, поршневой двигатель), которая затем – в электрическую (электрический генератор). Понятно, что это усложняет и удорожает энергоустановку.

газовых установок достигла 1,5 ГВт, а их электрический КПД – 62–64 %. В установках меньшей мощности КПД существенно ниже (52–54 %). Следует отметить, что такие значения КПД достигаются только при работе энергоустановок на номинальной нагрузке. При работе на частичных нагрузках КПД снижается значительно.

К настоящему времени возможности повышения КПД традиционных энергоустановок и их единичной мощности подошли к своему термодинамическому, механическому и экономически целесообразному пределу. Все меньший прирост КПД достигается все большим усложнением цикла,



Концепт трансмиссии Toyota FCV

Источник: Usedcars.ru

Повышение эффективности традиционных энергоустановок исторически шло, во-первых, по пути увеличения термодинамических параметров (температуры и давления) и, во-вторых, повышения единичной мощности агрегатов. Первое обусловлено ограничениями цикла Карно, а второе – сокращением удельных потерь с ростом размеров и, следовательно, мощности агрегата. Кроме того, при увеличении мощности единичного агрегата снижались удельные материалоемкость, стоимость, затраты на персонал и техническое обслуживание. Единичная мощность современных паро-

ростом температуры, которая в газовых турбинах уже достигла 1800 °С, увеличением капитальных затрат и стоимости ремонтов. Сверхбольшая единичная мощность современных энергоустановок начинает негативно влиять на функционирование электроэнергетической системы, в которую они включены.

У энергоустановок с топливными элементами имеется большой потенциал для совершенствования [6–8]. Эффективность современных серийно производимых единичных топливных элементов достигла 75 %, показана практическая достижимость

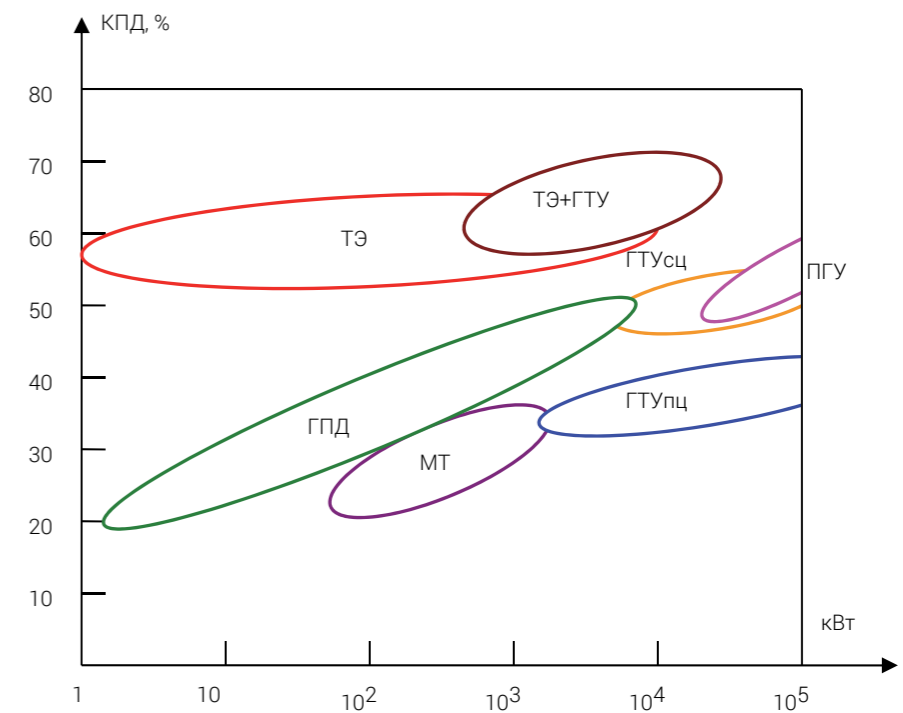
80 %. Это позволило уже на текущем уровне развития технологии создавать энергоустановки с топливными элементами с электрическим КПД 60–65 %. Важно, что это могут быть установки малой мощности – всего в несколько киловатт. В диапазоне мегаваттных мощностей в гибридном цикле (с ГТУ или ПГУ) можно рассчитывать на электрический КПД 70–75 %. В когенерационных и тригенерационных циклах эффективность использования химической энергии топлива может достигать 90 %. Очевидно, что в широком диапазоне мощностей у энергоустановок с топливными элементами просто нет конкурентов (рисунок 2). Отсутствие движущихся частей и минимизированная роль сжигания топлива обеспечивает высокую надежность и автономность работы таких установок при длительных сроках необслуживаемой эксплуатации.

Гибридные установки, включающие топливные элементы и микротурбины, интенсивно разрабатываются в Японии компанией MHI при финансовой поддержке правительства Японии [8]. Создано несколько демонстрационных образцов. Разрабатываются гибридные установки

Эффективность серийно производимых топливных элементов достигла 75 %, показана практическая достижимость 80 %. Это позволило создать энергоустановки на топливных элементах с КПД 60–65 %

электрической мощностью 250 и 1000 кВт на основе твердооксидных топливных элементов с рабочей температурой 900 °С и микротурбины. Топливом служит природный газ. Установка мощностью 250 кВт обеспечивает электрический КПД 55 % и более при выбросах оксидов азота менее 15 ppm [9]. Целью компании MHI является разработка гибридной энергоустановки электрической мощностью 100 МВт в составе твердооксидных топливных элементов, газовой и паровой турбины с суммарным электрическим КПД 70 %.

Рис. 2. Сопоставление КПД производства электроэнергии различными технологиями в диапазоне установленной электрической мощности от 1 кВт до 100 МВт, включая топливные элементы (ТЭ), газопоршневые двигатели (ГПД), микротурбины (МТ), газотурбинные установки простого цикла (ГТУпц), газотурбинные установки со сложным циклом (ГТУсц), парогазовые установки (ПГУ), гибридные установки (ТЭ+ГТУ).



Топливные элементы пока остаются дорогими. Это обусловлено небольшими объемами их выпуска. Переход к массовому производству неизбежно приведет к кратному снижению их стоимости

Топливные элементы пока остаются дорогими. Это обусловлено небольшими объемами их выпуска. Переход к массовому производству неизбежно приведет к кратному снижению их стоимости. Между тем, в отличие от мощных традиционных энергоблоков топливные элементы хорошо приспособлены к крупносерийному производству.

Топливные элементы (ТЭ) классифицируются по типу электролита и рабочим температурам (таблица 1) [6, 7]. К низкотемпературным топливным элементам относятся ТЭ с полимерной протонообменной мембраной (ПОМТЭ), прямые метанольные ТЭ (ПМТЭ) и щелочные ТЭ (ЩТЭ); к среднетемпературным – фосфорно-кислотные ТЭ (ФКТЭ); к высокотемпературным: расплавкарбонатные ТЭ (РКТЭ), твердооксидные ТЭ (ТОТЭ) с керамической мембранной и перспективная разновидность последних – протонкерамические ТЭ (ПКТЭ).

Технологическая схема энергоустановки с топливными элементами очень простая (рисунок 3) [6]. В анодное пространство батареи топливных элементов подается топливо, в катодное – воздух. Идеальным топливом для ТЭ является чистый водород. Однако высокотемпературные ТЭ (ТОТЭ) успешно работают и на синтез-газе (смеси H_2 и CO), получаемом из любого органического топлива. Продуктом реакции является вода и, при использовании синтез-газа, углекислый газ. Для использования в ТЭ природного газа или других жидких и газообразных углеводородных топлив, в технологическую схему энергоустановки включается топливный процессор. Это один или несколько каталитических реакторов, в которых исходное углеводородное топливо преобразуется в водород или синтез-газ. В случае производства синтез-газа топливный процессор состоит из одного реактора, при получении чистого водорода – из двух-трех.

Здесь следует указать на перспективность для стационарной энергетики разработки высокотемпературных протонкерамических топливных элементов. Протонпроводящие мембраны, благодаря меньшему размеру иона водорода, обладают лучшей проводимостью по сравнению с анионпроводящими. Такие топливные элементы имеют следующие преимущества: эффективно работают при меньших температурах, чем ТОТЭ; допускают прямую подачу углеводородных топлив в топливный элемент; облегчают организацию отвода тепла из зоны реакции потоком

Таблица 1. Типы топливных элементов

Типы ТЭ	ПОМТЭ	ЩТЭ	ФКТЭ	РКТЭ	ТОТЭ и ПКТЭ
Температура, °C	низкотемпературные 60–100	50–250	среднетемпературные 160–200	высокотемпературные 600–700	550–850
Электролит	Полимер	КОН	H_3PO_4	$LiCO_3/K_2CO_3$	$Y_2O_3-ZrO_2$
Анод	Pt/C	Pt/C	Pt/C	Сплав Ni	Ni/YSZ
Катод	Pt/C	Pt/C	Pt/C	NiO	LSM
Основное топливо	Водород	Водород	Синтез-газ	Синтез-газ	Синтез-газ
Окислитель	O_2 /воздух	O_2 /воздух без CO_2	O_2 /воздух	CO_2/O_2 /воздух	O_2 /воздух
КПД элемента, %	≈60	≈60	≈42	≈50	≈75
Диапазон мощности энергоустановки, кВт	0,001–500	0,001–100	50–11 000	200–5 000	0,01–250
Область применения	Транспортные, переносные, стационарные	Космос, транспортные, портативные	Стационарные, распределенная генерация	Стационарные средней и большой мощности	Стационарные, транспортные, переносные

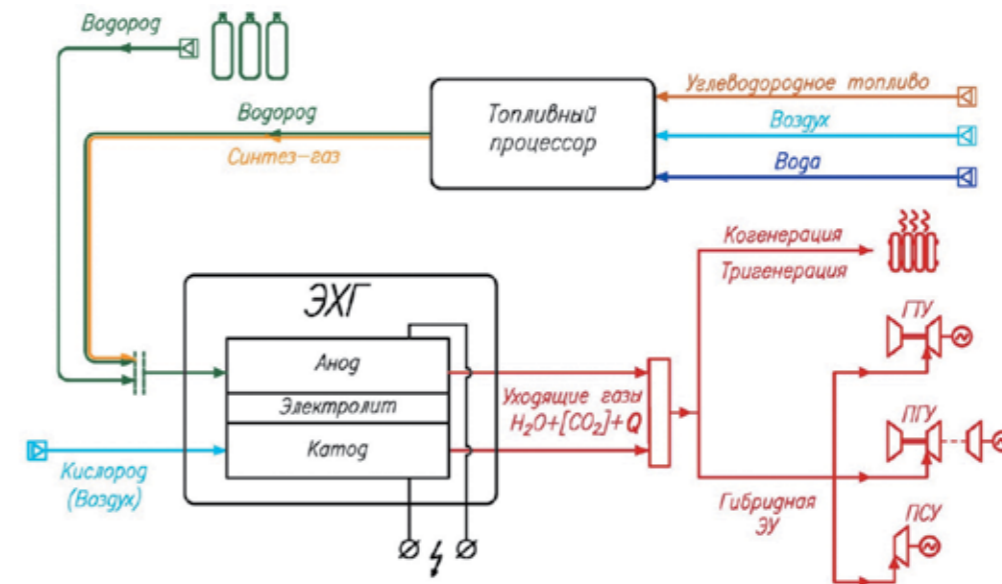


Рис. 3. Принципиальная технологическая схема энергоустановки с топливными элементами

окислителя – воздуха, поскольку сама реакция и сопутствующее ей тепловыделение происходят на катоде. Это позволяет отказаться от топливного процессора, существенно упрощает и удешевляет конструкцию установки и систему управления ею, снижает требования к конструкционным материалам, повышает эффективность и надежность работы всей энергоустановки.

зотурбинными, паросиловыми и парогазовыми энергоустановками.

В последние годы отмечается рост реализации энергоустановок с топливными элементами на мировом рынке. В 2019 году их годовая продажа достигла 70,9 тысяч штук, а суммарная установленная мощность составила 1130 МВт, впервые превысив уровень 1 ГВт в год и продемонстрировав 30-кратный рост по сравнению с 37 МВт в 2007 году [10]. Всего за период 2007–2019 годов в мире было введено в эксплуатацию более 4,3 ГВт установок с топливными элементами, из которых более 70 % пришлось на установки для стационарной энергетики. При этом востребованными оказались установки в широком диапазоне единичной электрической мощности – от единиц до сотен киловатт.

Наибольшим спросом пользуются низкотемпературные топливные элементы с полимерной мембраной (ПОМТЭ) и высокотемпературные топливные элементы с керамической мембраной (ТОТЭ). Первые имеют хорошие маневренные свойства – короткое время пуска-остановки, высокую скорость изменения нагрузки в широких пределах, и потому нашли применение на транспорте, в системах резервного электропитания, для покрытия пиковых нагрузок. Вторые получили приоритет в применении в стационарной энергетике, поскольку имеют наиболее высокий КПД, хотя и при довольно посредственных маневренных

В последние годы в мире идет рост реализации энергоустановок с топливными элементами. В 2019 г. их годовая продажа достигла 70,9 тыс. штук, а суммарная установленная мощность – 1130 МВт

Химический процесс в топливном элементе является экзотермическим, то есть происходит с выделением тепла, которое может быть утилизировано в когенерационных и тригенерационных циклах для нужд теплофикации и хладогенерации. В случае высокотемпературных топливных элементов тепловой поток имеет высокий потенциал и потому может успешно использоваться в гибридных циклах с га-



industriefotos-mitarbeiterfotos-linde-ag-italien-aussenansicht

Источник: eibmann-photographik.de

характеристиках. Объединение топливных элементов обоих типов в одной энергоустановке позволяет усилить их достоинства и нивелировать недостатки.

Принципиальной особенностью создания энергоустановок с топливными элементами является их модульность – набор мощности осуществляется из большого числа однотипных элементов (рисунок 3) [11]. Элементарной ячейкой являются единичные топливные элементы небольшой мощности, которые собираются в батареи. Последние объединяются в модули, из которых собираются энергоустановки и затем, если нужно, электростанции любой мощности. Эта особенность оборачивается

целым рядом достоинств энергоустановок с топливными элементами:

- массовое производство и применение однотипных изделий обеспечивает их высокую надежность, снижение их стоимости и высокий уровень ремонтпригодности энергоустановок;
- модульность конструкции позволяет снижать стоимость и сроки разработки энергоустановок за счет унификации модулей и технических решений, отработывая конструкцию и технологию на менее дорогих изделиях небольшой мощности;
- широкий диапазон регулирования мощности, недоступный для традиционных энергоустановок, и высокий КПД во всем регулируемом диапазоне (регулирование мощности путем выключения части модулей с сохранением общей эффективности);
- возможность обеспечивать требуемую установленную мощность электростанции за счет параллельной работы установок оптимальной размерности, выпускаемой в массовых масштабах.

Для стационарной энергетики наиболее перспективной областью применения энер-

Для климатических условий России особый интерес представляют когенерационные установки с топливными элементами из-за крайней необходимости модернизации систем центрального теплоснабжения

гоустановок с топливными элементами на ближайшую перспективу следует считать источники питания для автономных потребителей и распределенной генерации [12]. Здесь они могут заменить используемые сейчас в качестве основных и резервных генераторов дизельные и газопоршневые двигатели, ГТУ и микротурбины. При этом установки с топливными элементами могут легко объединяться в Smart Grid, работая параллельно между собой и/или с распределительной сетью в островном режиме. В дальнейшем, по мере отработки и удешевления технологии они смогут проникать и в большую энергетику. Для климатических условий России особый интерес представляют когенерационные установки с ТЭ, в том числе в целях крайне необходимой модернизации имеющихся систем централизованного теплоснабжения [13].

Энергоустановки с топливными элементами могут эффективно использоваться в системах длительного хранения энергии, получаемой от ВИЭ со стохастическим характером выработки электроэнергии (солнечными и ветровыми электростанциями). Для покрытия нагрузки в периоды дефицита мощности в топливных элементах используется водород, получаемый электролизом и накапливаемый в периоды избыточной генерации ВИЭ.

Новая мегастанция в Шанхае

Источник: Carsweek.ru



Потенциальная емкость российского рынка энергоустановок с топливными элементами для стационарного применения до 2035 г. оценена в 55 ГВт электрической мощности и 131 тыс. Гкал/ час тепловой

В России со времен СССР разработкой топливных элементов и энергоустановок на их основе занимается более десятка организаций. Наиболее широко исследования и разработки в этом направлении проводились во второй половине прошлого века, в основном для космических программ и для флота, в том числе подводного, однако до крупномасштабного производства дело не дошло. Отечественная электрохимическая наука была одной из сильнейших в мире и, несмотря на снизившуюся на рубеже веков активность, имеются возможности для успешной реализации отечественных разработок энергоустановок с топливными элементами:

- сохранены научные и научно-технические школы;
- имеются заделы и успешный практический опыт разработок, производства и эксплуатации топливных элементов, развиваются технологии и производство топливных элементов в кооперации академических и прикладных научных центров, промышленных и коммерческих структур;
- имеются производственные мощности со специализированным оборудованием;



Проект топливных элементов Bosch FreshH₂
Источник: Bosch.fr

- имеются значительные внутренние потребности в эффективных экологически чистых источниках энергии различного мощностного диапазона и перспективы их экспорта на мировые рынки;
- возрастает интерес бизнеса к данной проблеме: формируются долгосрочные программы развития водородной инфраструктуры крупными государственными и частными компаниями – «Росатом», «Газпром», «ЛУКОЙЛ», «НОВАТЭК» и др.

Активно включаются в создание транспортных средств с водород-воздушными топливными элементами и отечественные автопроизводители. В планах КАМАЗа разработка электробуса, карьерного самосвала и седельного тягача с топливными элементами. Российские железные доро-

ги разрабатывают проекты пассажирских электропоездов, маневровых локомотивов, ремонтных и тоннельных поездов с топливными элементами. В ЦНИИ судовой электротехники создан экспериментальный трамвай на топливных элементах. ЦИАМ совместно с Институтом проблем химической физики РАН и «ИнЭнерджи» разработали маломерный пилотируемый самолет с топливными элементами. Имеются и другие проекты, находящиеся на разных стадиях осуществления.

Актуальность проведения в стране исследований и разработок в области топливных элементов признана Советом 20 «Б» по научно-технологическому приоритету «Переход к экологически чистой и ресурсосберегающей энергетике, повышение эффективности добычи и глубокой переработки углеводородного сырья, формирование новых источников, способов транспортировки и хранения энергии». В 2018 году Советом 20 «Б» был одобрен проект «Топливные элементы для стационарной и мобильной энергетике», инициатором которого является «ИнЭнерджи». В 2019 году данный проект получил одобрение координационного совета по приоритетным направлениям научно-технологического развития РФ при президенте РФ. К сожалению, до сих пор не определен федеральный орган исполнительной власти, который мог бы выступить в качестве ответственного исполнителя-координатора данного проекта. По нашему мнению, в наибольшей степени для этих целей подходит Минэнерго России.

Потенциальная емкость российского рынка энергоустановок с топливными элементами для стационарного применения на период до 2035 года оценена в 55 ГВт электрической мощности и 131 тыс. Гкал/час тепловой [6]. Имеются реальные воз-

Страны, первыми освоившие масштабное производство энергоустановок на топливных элементах с конкурентной стоимостью жизненного цикла, получают глобальные преимущества на многие годы вперед



HMC at H₂ Mobility + Energy Show
Источник: Logist.today

можности существенного улучшения технико-экономических показателей энергоустановок с топливными элементами с достижением превосходства над альтернативными техническими решениями. Все это служит основанием для развертывания в стране крупномасштабных НИОКР в области топливных элементов и организацией производства соответствующего оборудо-

вания. Целью этих работ должно стать создание отечественных энергоустановок с топливными элементами различной мощности и областей применения, конкурентоспособных с лучшими мировыми образцами. Для поддержания передовых позиций и конкурентоспособности на внутреннем и международном рынках производство энергоустановок с топливными элементами должно быть полностью (от высокотехнологической переработки сырья для производства топливных элементов до изготовления конечной продукции) локализовано в России на высокоавтоматизированных промышленных предприятиях, обеспечивающих массовое производство продукции с минимальными издержками, высокую эффективность и надежность.

Вполне обосновано можно утверждать, что на сегодняшний день не известна иная экономически целесообразная технология преобразования химической энергии топлива в электрическую, способная конкурировать по эффективности и экологичности с топливными элементами. Страны, первыми освоившие крупномасштабное производство энергетических установок на основе топливных элементов с конкурентной стоимостью жизненного цикла и надежностью и начавшие их использование в энергетике, получают глобальные преимущества на многие годы вперед.

Использованные источники

1. *World Energy Outlook. 2019.* – International Energy Agency, Vienna, 2019. – 860 p.
2. *World energy and transition to sustainable development / Belyaev L.S., Marchenko O.V., Filippov S.P., Solomin S.V., Stepanova T.B., Kokorin A.L.* // Kluwer Academic Publishers, 2002. – 264 p.
3. *Studies on the potential role of different energy sources in the 21st century / Belyaev L.S., Filippov S.P., Marchenko O.V., Tytyshnyi V.N.* // Int. J. Global Energy Issues, Vol. 17, No. 4, 2002. P. 311–326.
4. *Hydrogen Economy Outlook: Key messages.* - Bloomberg NEF, 2020, 30 March – 12 p. (URL: <https://data.bloomberglp.com/professional/sites/24/BNEF-Hydrogen-Economy-Outlook-Key-Messages-30-Mar-2020.pdf>; accessed on 14.07.2020).
5. *The National Hydrogen Strategy / Federal Ministry for Economic Affairs and Energy, Germany, Berlin, June 2020.* – 28 p.
6. Кашин А.М., Голодницкий А.Э. Энергетические установки с топливными элементами – перспективы практического использования в электроэнергетике // Вести в электроэнергетике. 2019, № 1.
7. Бредихин С.И., Голодницкий А.Э., Дрожжин О.А., Истомин С.Я., Ковалевский В.П., Филиппов С.П. Стационарные энергетические установки с топливными элементами: материалы, технологии, рынки. – М.: НТФ «Энергопрогресс» Корпорации «ЕЭЭК», 2017. 392 с.
8. Popel O. S., Tarasenko A. B., Filippov S. P. Fuel Cell Based Power-Generating Installations: State of the Art and Future Prospects // *Thermal Engineering*, 2018, Vol. 65, No. 12. P. 859–874. ISSN 0040-6015.
9. Kobayshi Y., Tomida K., Nishiura M., Hiwatashi K., Kishizawa H., Takenobu K. Development of Next-Generation Large-Scale SOFC toward Realization of a Hydrogen Society // *Mitsubishi Heavy Industries Technical Review*, Vol. 52, No. 2, 2015. P.111–116.
10. *The Fuel Cell Industry Review. E4tech. 2019.* – URL: <http://www.afhyapac.org/documents/publications/rapports/TheFuelCellIndustryReview2019.pdf>
11. – URL: <https://www.bloomenergy.com/>
12. Filippov S. P., Dilman M. D., Ilyushin P. V. Distributed Generation of Electricity and Sustainable Regional Growth // *Thermal Engineering*, 2019, Vol. 66, No. 12. P. 869–880.
13. Filippov S. P., Dilman M. D. CHP Plants in Russia: the Necessity for Technological Renovation // *Thermal Engineering*, 2018, Vol. 65, No. 11. P. 775–790.