

Электрохимические технологии, как основа «новой энергетики» в условиях четвёртого энергоперехода



Сформировалась и получает развитие мировая тенденция перехода к безуглеродной экономике, в которой основой новой энергетики становятся возобновляемые источники энергии и водород как первичный энергоноситель.

А.М. КАШИН, А.Э. ГОЛОДНИЦКИЙ, к.т.н., Группа компаний «ИнЭнерджи»

В представленном на рисунке 1 [1] прогнозе развития источников электроэнергии увеличение в энергобалансе доли возобновляемых источников генерации со стохастическим характером выработки — ВЭС (36%) и СЭС (22%) составляет в общей сложности 58%, в то время как доля нерегулируемых мощностей АЭС составит 4%, а регулирующих мощностей ГЭС — всего 12%. Обеспечение устойчивости энергосистемы в этом случае потребует сбалансированного развития тепловой генерации на водороде для резервирования и регулирования.

Главное достоинство перехода на водород — исключение эмиссии в атмосферу углекислого газа — конечно же, если её не будет при самом производ-

стве водорода. Экологическая чистота водорода делает его привлекательным для покрытия энергетических нужд мегаполисов и крупных городов с высоким удельным энергопотреблением на единицу площади. Но главное — водород особенно привлекательный энергоноситель для использования в мобильной (транспортной) энергетике, на долю которой приходится большая часть выбросов углекислого газа. При этом безальтернативной технологией замещения традиционных двигателей внутреннего сгорания, оправдывающей переход к водородной энергетике с энергетической и экономической точек зрения, становятся энергоустановки (ЭУ) с топливными элементами (ТЭ) [2].

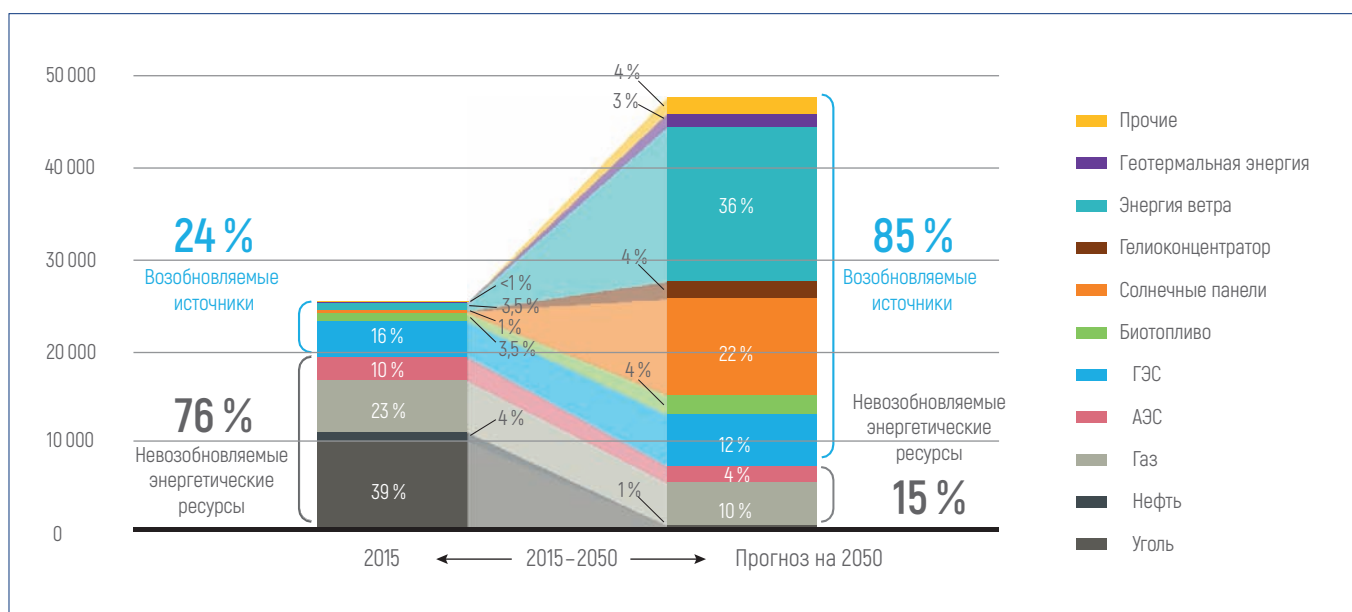


Рис. 1. Источники генерации электроэнергии (ТВт·ч/год) [1]

Подтверждением этому служит и то, что ключевым элементом Национальной водородной стратегии Германии является многомиллиардная «Национальная инновационная программа в области водородных технологий и ТЭ». Ещё раньше активные разработки ТЭ 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 — безмашинная технология прямого, то есть в одну стадию, преобразования химической энергии топлива в электрическую. Главными конкурентными преимуществами энергетических установок с ТЭ являются их высокая энергетическая эффективность, надёжность, практически отсутствие вредных выбросов и бесшумность (рис. 2).

В традиционных ЭУ с тепловыми машинами, как известно, имеется несколько промежуточных стадий преобразования энергии с соответствующими потерями в каждой. Сначала химическая энергия топлива превращается в тепловую энергию рабочего тела (камера сгорания, паровой котёл), затем тепловая энергия преобразуется в механическую (турби-

на, поршневой двигатель) и лишь потом — в электрическую (электрический генератор). Понятно, что это усложняет и удорожает энергоустановку, снижает её эффективность.

Повышение эффективности традиционных ЭУ 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 материалоёмкость, стоимость, затраты на персонал и техническое обслуживание. Единичная мощность современных парогазовых установок превысила 1,5 ГВт, а их электрический КПД достиг 62–64%. В установках меньшей мощности КПД существенно ниже (52–54%). Следует отметить, что такие значения КПД достигаются только при работе ЭУ на номинальной нагрузке. При работе на частичных нагрузках, в отличие от ЭУ с ТЭ, КПД снижается значительно. [2]

К настоящему времени возможности повышения КПД традиционных ЭУ и их единичной мощности подошли к своему термодинамическому, механическому и экономически целесообразному пределу. Всё меньший прирост КПД достигается всё большим усложнением цикла, ростом температуры, которая в газовых турбинах уже превысила 1600 °С, увеличением капитальных затрат и стоимости ремонтов.

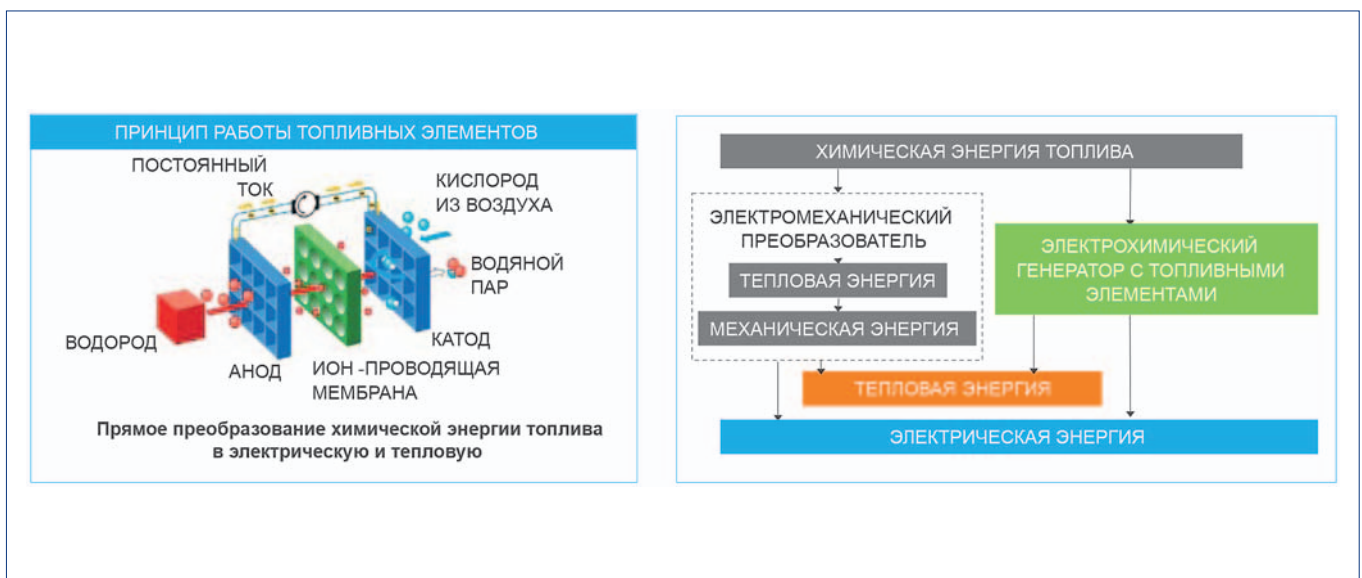


Рис. 2. Цикл прямого преобразования химической энергии топлива в водород-воздушных топливных элементах и сравнение его с циклом электромеханических преобразователей энергии

У ЭУ с ТЭ имеется большой потенциал для совершенствования. Эффективность современных серийно производимых единичных ТЭ достигла 75 %, показана практическая достижимость 80 %. Это позволило уже на текущем уровне развития технологии создавать ЭУ с ТЭ с электрическим КПД 60–65 %. Важно, что это могут быть ЭУ малой мощности — всего в несколько киловатт. Химический процесс в ТЭ является экзотермическим, то есть происходит с выделением тепла, которое может быть утилизировано в когенерационных и тригенерационных циклах, при этом эффективность использования химической энергии топлива может достигать 90 %. Очевидно, что в широком диапазоне мощностей у ЭУ с ТЭ просто нет конкурентов. Отсутствие движущихся частей и минимизированная роль сжигания топлива обеспечивают высокую надёжность и автономность работы таких установок при длительных сроках необслуживаемой эксплуатации.

Особенно эффективно использование электрохимических генераторов с ТЭ в гибридных ЭУ с накопителями энергии — аккумуляторными батареями, покрывающими пики потребления энергии и заряжающимися от электрохимических генераторов в периоды дефицита нагрузки.

Принципиальная особенность создания ЭУ с ТЭ заключается в их модульности (рис. 3). Элементарной ячейкой являются единичные ТЭ ограниченной мощности, которые собираются в батареи, причем

достижение требуемой мощности батареи осуществляется за счёт увеличения числа ТЭ, при этом сами ТЭ могут производиться всего нескольких типоразмеров. Батареи объединяются в модули, из которых собираются электрохимические генераторы и затем, если нужно, энергоустановки требуемой мощности. Эта особенность оборачивается целым рядом достоинств энергоустановок с ТЭ:

- массовое производство и применение однотипных изделий обеспечивают их высокую надёжность, снижение стоимости и высокий уровень ремонтпригодности ЭУ;
- модульность конструкции позволяет снижать стоимость (рис. 4) [3] и сроки разработки ЭУ с ТЭ за счёт унификации модулей и технических решений, отрабатывая конструкцию и технологию на менее дорогих изделиях небольшой мощности;
- широкий диапазон регулирования мощности, недоступный для традиционных ЭУ, и высокий КПД во всем регулировочном диапазоне (регулирование мощности путём включения части модулей с сохранением общей эффективности);
- возможность обеспечивать требуемую установленную мощность ЭУ за счёт параллельной работы электрохимических генераторов оптимальной размерности, выпускаемых в массовых масштабах.

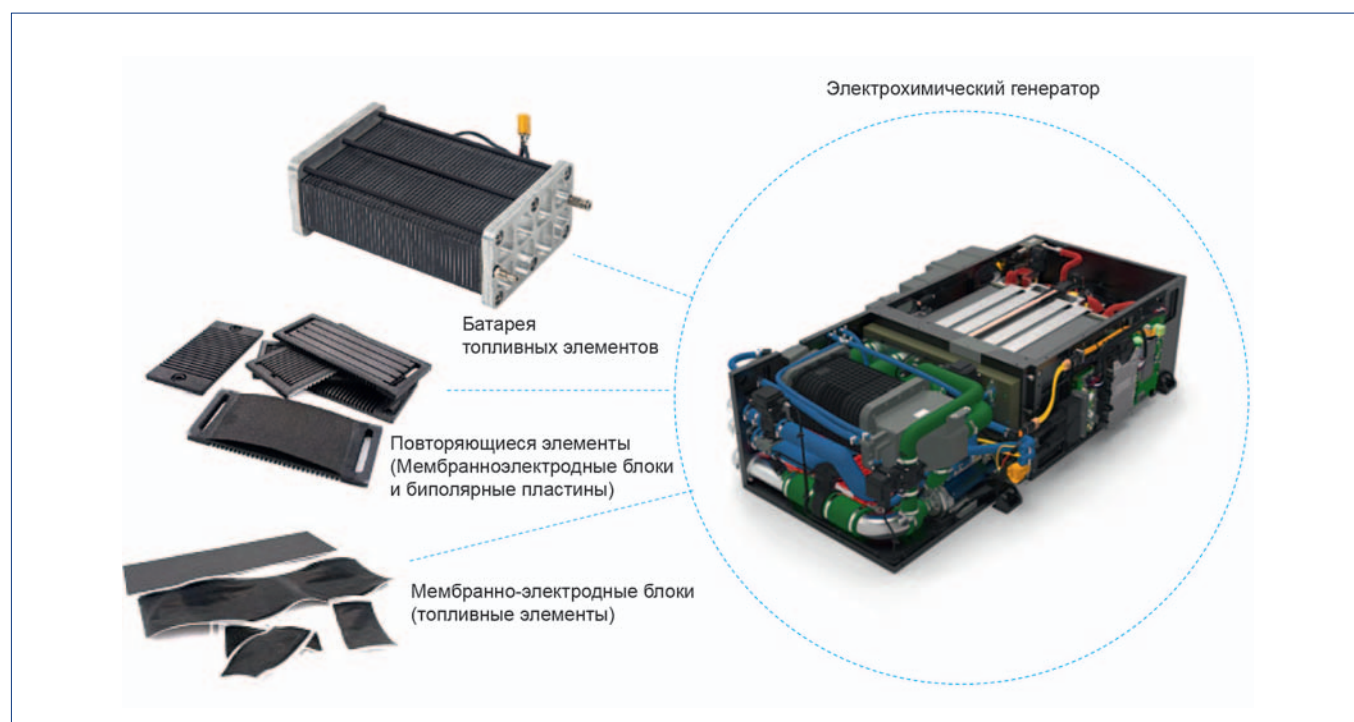


Рис. 3. Принцип построения электрохимического генератора с водород-воздушными топливными элементами

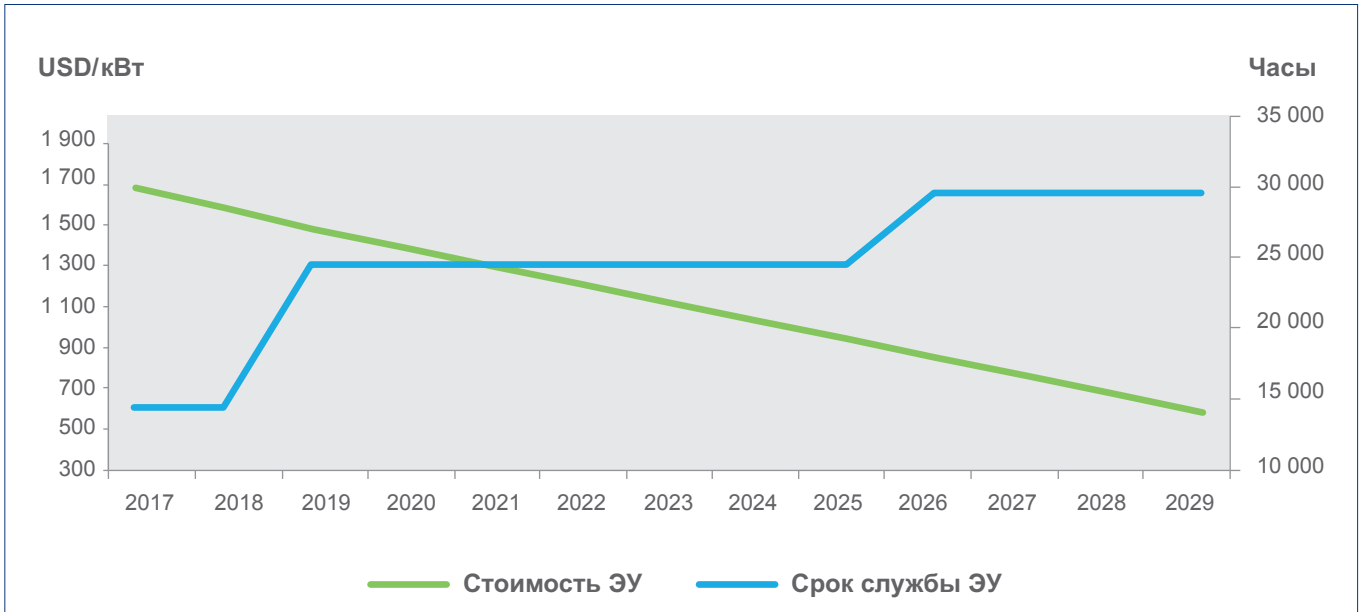


Рис. 4. Прогноз снижения стоимости ЭУГ [3]

Всё это определило устойчивую тенденцию роста ввода в эксплуатацию энергетических установок с ЭУГ с ТЭ — с 37 МВт в 2007 г. до 1,319 ГВт в 2020 г., т.е. в 36 раз. Всего же за период 2007–2020 гг. в мире было введено в эксплуатацию более 4,5 ГВт таких установок, при этом наиболее быстрыми темпами растёт спрос на транспортные ЭУГ — с 6 МВт в 2007 г. до 993,5 МВт в 2020 г., т.е. в 166 раз (рис. 5) [4]. Среди известных типов топливных элементов наибольшее распространение получили низкотемпературные (рабочая температура до 100 °С) водород-воздушные ТЭ с твердополимерной протонобменной мембраной (ПОМТЭ) — их доля в реализованных в 2020 г. 82,4 тыс. ЭУГ составила 53,6 тыс. шт. (65%) суммарной мощностью 1,03 ГВт (78%) и они получили практически монопольное положение на транспорте.

Однако переход к безуглеродной экономике на основе топливных элементов требует создания водородной инфраструктуры — применение высокотемпературных топливных элементов, способных использовать в качестве топлива углеводороды, способно сократить выбросы углекислого газа только за счёт более высокой эффективности преобразования энергии, но не снизит их радикально.

Водород как энергоноситель обладает целым рядом уникальных достоинств. Его теплотворная способность на единицу массы — 33,3 кВт·ч/кг — втрое превосходит аналогичный показатель используемых в настоящее время газообразных и жидких углеводородных топлив. Продуктом окисления (сгорания) водорода является вода, из которой снова можно по-



Рис. 5. Коммерциализация энергоустановок с топливными элементами в мире [4]

лучить водород, что обоснованно позволяет считать его экологически чистым возобновляемым энергоносителем. Водород служит идеальным и, в ряде случаев, единственным первичным энергоносителем для наиболее эффективных и экологически чистых устройств преобразования энергии — топливных элементов.

При этом использование водорода в качестве топлива связано с рядом проблем.

Водород — самый распространённый элемент во Вселенной и второй по распространённости элемент

на Земле после кислорода, неисчерпаемое количество водорода находится в связанном состоянии в воде, а также в ископаемых углеводородах. Однако лишь пренебрежимо малая доля водорода находится в несвязанном виде. Водород не является ископаемым ресурсом, его нельзя добывать из земной коры, как традиционное углеводородное топливо — чтобы выделить водород из связанного состояния, необходимо затратить энергию, превышающую его теплотворную способность.

Водород — самое лёгкое вещество на планете, находящееся в газообразном состоянии до температуры минус 253 °С, его плотность при нормальных климатических условиях составляет 0,09 кг/м³ — на порядок меньше плотности природного газа (0,68–0,85 кг/м³) и на четыре порядка — жидких моторных топлив (700–850 кг/м³). При сжатии водород ведет себя как неидеальный газ — его плотность при сжатии увеличивается непропорционально увеличению давления: при стандартизированных давлениях 350 и 700 бар плотность водорода составляет 23 и 40 кг/м³ соответственно, а плотность в сжиженном состоянии — 70,8 кг/м³. Это вызывает существенные проблемы при хранении и транспортировании водорода — в современных композиционных баллонах высокого давления масса содержащегося водорода, как правило, не превышает 6 % массы баллона, а в криогенных сосудах даже большого объёма — 9 %. Кроме того, сжатие водорода требует значительных энергетических затрат, а хранение и транспортирование в жидком состоянии — ещё больших затрат на сжижение и регазификацию, превышающих затраты на собственно получение водорода паровой конверсией метана, к которым добавляются потери водорода в результате испарения.

В отсутствие крупнотоннажного производства водорода, для развития водородной транспортной заправочной инфраструктуры изложенное выше определяет целесообразность объединения установок получения водорода и водородных газовых заправочных станций в единые стационарные модульные водородные газозаправочные комплексы (ВГЗК), располагаемые в местах эксплуатации транспортных средств.

Такие модульные ВГЗК заводской готовности будут состоять из установок получения водорода, ресиверов водорода, компрессорного оборудования и раздаточных колонок и, при соблюдении требований безопасности, могут располагаться аналогично традиционным автозаправочным станциям (рис. 6).

При наличии предприятий с избыточными мощностями производства водорода строительство водородных газозаправочных станций может быть экономически целесообразным близ территорий таких предприятий с поставкой водорода на заправочные станции по трубопроводу.

Способы получения водорода

Для получения водорода используются следующие основные способы:



- электролиз воды;
- конверсия и окисление водородсодержащих газов и жидкостей;
- пиролиз угля;
- термическое разложение водородсодержащих веществ;
- паровое или кислотное окисление металлов;
- биотехнологические и другие способы.

В мире ежегодно потребляется около 75 млн тонн водорода, использующегося пока преимуще-



Рис. 6. Водородный газозаправочный комплекс

Таблица 1. «Цветовая» классификация водорода по способу его получения.

«Цвет» водорода	Способ получения
 Зелёный	 Электролизом воды с использованием электроэнергии, произведённой ВИЭ (СЭС, ВЭС, ГЭС)
 Розовый	 Электролизом с использованием электроэнергии, произведённой АЭС
 Жёлтый	 Электролизом с использованием электроэнергии смешанного происхождения — произведённой ВИЭ, ТЭС, АЭС и т.п.
 Голубой	 Методом паровой или автотермической конверсии природного газа с улавливанием и захоронением или утилизацией CO ₂
 Бирюзовый	Термическим разложением природного газа с получением твёрдого углерода, в том числе в виде товарного продукта
 Серый	 Из ископаемых топлив, преимущественно из природного газа, без улавливания CO ₂
 Коричневый	Из лигнитов (бурых углей)
 Чёрный	Из каменных углей
 Белый	В качестве побочного продукта промышленного производства

ственно в нефтехимической промышленности и для производства аммиака. При этом более 3/4 потребляемого водорода производится методом паровой конверсии природного газа, почти весь остальной — газификацией угля и лишь около 100 тыс. тонн вырабатывается электролизом. В связи с проводимой политикой декарбонизации существенное значение придается «происхождению» водорода с точки зрения выделяющегося при его производстве углекислого газа и других вредных веществ, для характеристики которого даже введена «цветовая» классификация (таблица 1).

По объективным причинам перспективы получения «зелёного» водорода в России связаны с развитием распределённой возобновляемой энергетики, в краткосрочном плане для развития транспортной инфраструктуры возможно производство

«жёлтого» водорода электролизом воды, «голубого» и «серого» — паровой конверсией углеводородов, при развитии соответствующей технологии — «бирюзового» пиролизом природного газа.

В России признанным технологическим лидером в области электрохимических решений для новой энергетики считается основанная в 2015 г. компания «ИнЭнерджи», обладающая ключевыми технологиями по всей цепочке добавленной стоимости топливных элементов и находящаяся в пятерке самых инновационных и десятке самых быстрорастущих компаний по версии «ТехУспех». Распределённые исследования и совместные с ведущими исследовательскими институтами РФ лаборатории позволяют решать фундаментальные и прикладные задачи по разработке принципиально новых наукоёмких продуктов, а собственное производство —

воплощать результаты исследований и разработок в товарную продукцию. В сферу деятельности компании входит разработка и производство как энергетических установок с топливными элементами, так и водородной заправочной инфраструктуры.

В настоящее время «ИнЭнерджи» в рамках Соглашения с Правительством Москвы участвует в проекте создания городского автобуса на водородном топливе в части разработки энергетической установки с топливными элементами и водородной заправочной инфраструктуры.

В таблице 2 приведена сравнительная оценка себестоимости водорода на такой модульной ВГЗК производительностью 10 кг/ч, рассчитанной на заправку восьми городских пассажирских автобусов

в сутки, при различных способах производства водорода. Следует отметить, что с увеличением производительности ВГЗК пропорционально снизится ФОТ эксплуатационного персонала, снизятся удельные капитальные и операционные затраты на ВГЗК в целом.





Проведённое сравнение городских автобусов с различными типами силовых установок показало, что автобус с водородной энергоустановкой при себестоимости водорода, получаемого на ВГЗК методом паровой конверсии природного газа, по стоимости жизненного цикла пока и проигрывает автобусам с дизельными и газопоршневыми двигателями, но оказывается дешевле электробусов с аккумуляторными батареями (таблица 3). Ожидаемое

Таблица 2. Сравнительная оценка себестоимости водорода на ВГЗК производительностью 10 кг/ч

	Паровая конверсия		Электролиз
Энергетический и материальный балансы			
Исходное вещество	Метан	Пропан	Вода
Суммарная реакция	$\text{CH}_4 + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO}_2 + 4\text{H}_2$	$\text{C}_3\text{H}_8 + 3\text{H}_2\text{O} \rightarrow 3\text{CO}_2 + 10\text{H}_2$	$2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{H}_2 + \text{O}_2$
Масса углеводорода для получения 1 кг водорода + сжигаемого для поддержания температуры с учетом % выделения чистого водорода из водородсодержащей смеси газов, кг	3,56	4	—
Масса воды для получения 1 кг водорода, кг	5,1	6,9	9
Суммарные затраты электроэнергии на производство 1 кг водорода и сжатия его до 40 МПа, кВт·ч	1 + 5 = 6		56 + 5 = 61
Операционные затраты при эксплуатации ВГЗК			
Материальная и энергетическая составляющая затрат на производство 1 кг водорода, руб./кг	48,2	124,28	244,36
ФОТ эксплуатационного персонала, руб./кг	54		
Капитальные и операционные затраты на ВГЗК			
Оценочная стоимость установки получения водорода производительностью 10 кг/ч, млн руб.	80	85	250
Оценочная стоимость заправочной станции с максимальным расходом 150 кг/ч*, тыс. руб.	90 000		
Назначенный ресурс ВГЗК, тыс. ч	100 000		
Количество произведённого и отпущенного водорода за срок службы, кг	1 000 000		
Затраты на эксплуатацию и ТОиР, тыс. руб./год / руб./кг _{водорода}	800/9		10 000/114,2
Удельные амортизационные отчисления и налог на имущество*, руб./кг _{водорода}	178,5	183,8	357,1
Себестоимость отпускаемого водорода без НДС / с НДС, руб./кг	290/348	371/445	770/924

* Срок эксплуатации оборудования 10 лет, остаточная стоимость 20 %.

Таблица 3. Сравнение стоимости владения городских автобусов с различными типами силовых установок

	 ВОДОРОД+АКБ	 АКБ	 ГАЗ	 ДИЗЕЛЬ
Стоимость владения (сейчас), руб./км	155,9	178,6	114,9	113,6
в том числе:				
Стоимость автобуса, руб./км	35,5 [33,2]	33,0	14,4	13,1
Стоимость обслуживания, руб./км	15,2	23,3	13,0	15,5
Стоимость топлива, руб./км	43,9	2,2	11,9	21,4
Стоимость электроэнергии, руб./км	–	8,45	–	–
Другие затраты (ФОТ и т.д.)	63,6	111,7	75,7	63,6
Снижение стоимости владения (перспектива руб./км)				
Стимулы для внедрения водорода (до 50%)	-22,0	–	–	–
Снижение стоимости ЭУ и АКБ, руб./км	-3,0	-3,2	–	–

введение налога на выбросы углекислого газа может сместить сравнение в пользу водоробусов.

В заключение хотелось бы обратить внимание на высокий потенциал снижения стоимости ЭУ с ТЭ при организации их серийного производства. С точки зрения технологической зрелости рынок топливных элементов отстаёт от рынка литиевых накопителей примерно на 10–15 лет. Таким образом, ранняя стадия рынка, в первую очередь объяснимая слабой готовностью инфраструктуры, будет сохраняться

ещё определённое время, и её преодоление потребует от российских разработчиков и производителей топливных элементов глубокой вертикальной интеграции по всей структуре добавленной стоимости ЭУ. И здесь, безусловно, не обойтись без международного сотрудничества с мировыми лидерами. Задача профессионального экспертного сообщества — проактивно способствовать формированию рынка, воспитывать квалифицированного заказчика, создавать отрасль «новой энергетики» в стране.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Global Energy Transformation: A roadmap to 2050. IRENA (2018), International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi. www.irena.org/publications*
2. С. Филиппов, А. Голодницкий, А. Кашин. «Топливные элементы и водородная энергетика». Журнал «Энергетическая политика», № 11(153), ноябрь 2020, стр. 28–39.
3. *Fueling the Future of Mobility Hydrogen and fuel cell solutions for transportation Volume 1 Deloitte China. <https://www2.deloitte.com/content/dam/Deloitte/cn/Documents/finance/deloitte-cn-fueling-the-future-of-mobility-en-200101.pdf>*
4. *The Fuel Cell Industry Review 2020. E4tech. <https://fuelcellindustryreview.com>*