

# Энергетические установки с топливными элементами —

*перспективы практического использования в электроэнергетике*

Алексей КАШИН, Андрей ГОЛОДНИЦКИЙ, к.т.н. Группа компаний «ИнЭнерджи»

Альтернативным, а на сегодняшнем уровне развития можно даже сказать безальтернативным, способом повышения эффективности получения электрической энергии из топлива является использование топливных элементов (ТЭ) — устройств прямого преобразования химической энергии в электрическую.

Процесс производства электроэнергии в ТЭ проходит в одну стадию без промежуточных преобразований химической энергии в тепловую, тепловой — в механическую, а затем уже в электрическую, благодаря чему энергоустановки (ЭУ) с ТЭ значительно более эффективны и экологически чисты. Эффективность современных ТЭ достигает 75%, показана практическая достижимость и 80% значений, что уже на текущем уровне развития технологии позволяет создавать ЭУ с КПД<sub>эл</sub> до 65% начиная с малых мощностей — всего в несколько киловатт, в простом и когенерационном циклах, где КПД

электромеханических преобразователей (ЭМП) кратно ниже (наивысший КПД<sub>эл</sub> — 63%, достигнут на ПГУ мощностью 1 млн 682 тыс. кВт!), и до 75% в диапазоне больших мощностей в гибридном цикле с ГТУ, ПСУ и ПГУ. Общая же эффективность использования химической энергии топлива в ЭУ с ТЭ может превышать 90%. В ТЭ нет движущихся частей и минимизирована роль сжигания топлива, что обеспечивает надёжную работу ЭУ при длительных сроках необслуживаемой эксплуатации.

Топливные элементы классифицируются по типу электролита и рабочим температурам (табл. 1) [1]. К низкотемпературным (рабочая температура до 100°C) относятся щелочные ТЭ (ЩТЭ) и ТЭ с полимерной протонообменной мембраной (ПОМТЭ), к среднетемпературным (рабочая температура 150–250°C) — фосфорно-кислотные ТЭ (ФКТЭ), к высокотемпературным (рабочая температура 500–900°C) — расплавкарбонатные ТЭ

Табл. 1. Типы топливных элементов

Типы ТЭ	ЩТЭ	ПОМТЭ	ФКТЭ	РКТЭ	ТОТЭ
Температура, °С	низкотемпературные		среднетемпературные	высокотемпературные	
	50–250	30–100	160–220	600–700	550–850
Электролит	КОН	Полимер	H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	LiCO <sub>3</sub> /K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -ZrO <sub>2</sub>
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 <sub>2</sub> /воздух без CO <sub>2</sub>	O <sub>2</sub> /воздух	O <sub>2</sub> /воздух	CO <sub>2</sub> /O <sub>2</sub> /воздух	O <sub>2</sub> /воздух
КПД элемента, %	≈ 60	≈ 60	≈ 42	≈ 50	≈ 75
Диапазон мощности ЭУ, кВт	0,001–100	0,001–500	50–11 000	200–5 000	0,01–250
Область применения	Космос, транспортные, портативные	Транспортные, переносные, стационарные	Стационарные, аварийное электроснабжение	Стационарные средней и большой мощности	Стационарные, гибридные, транспортные, переносные

(РКТЭ), керамические твёрдооксидные ТЭ (ТОТЭ) и, перспективная разновидность последних, протон-керамические ТЭ (ПКТЭ).

Наибольшее распространение получили ПОМТЭ и ТОТЭ. Их общая доля в реализованных в 2018 г. 74,3 тыс. шт. ЭУ с ТЭ суммарной мощностью 803,1 МВт в количественном отношении приблизилась к 95% — 42,6 тыс. шт. (57,3%) ЭУ с ПОМТЭ общей мощностью 589,1 МВт и 27,8 тыс. шт. (37,4%) ЭУ с ТОТЭ общей мощностью 91,0 МВт. Более подробно остановимся именно на этих двух типах элементов: низкотемпературных — ПОМТЭ и высокотемпературных — ТОТЭ.

Рассмотрим принцип работы топливного элемента — электрохимического устройства, в котором энергия химической реакции между топливом и окислителем превращается в электрическую энергию без промежуточного преобразования в механическую энергию.

На рис. 1 показаны функциональные схемы рассматриваемых типов ТЭ. Такие топливные элементы состоят из разделённых газоплотным твёрдым электролитом газопроницаемых электродов — анода и катода. К аноду подводится топливо, к катоду — окислитель, через мембрану электролита, которая может быть протонпроводящая (ПОМТЭ и ПКТЭ) или анионпроводящая (ТОТЭ), осуществляется перемещение образующихся на электродах положительно или отрицательно заряженных ионов.

В высокотемпературных ТЭ — ТОТЭ и ПКТЭ — мембрана электролита керамическая, в ПОМТЭ —

полимерная. Протонпроводящие мембраны, благодаря меньшему размеру иона водорода, обладают лучшей проводимостью по сравнению с анионпроводящими. В связи с этим очень многообещающими представляются работы по созданию высокотемпературных протонкерамических ТЭ, обладающих, в дополнение к присущим достоинствам ТОТЭ, следующими преимуществами:

- эффективно работают при меньших температурах;
- допускают прямую подачу углеводородных топлив на ТЭ;
- облегчают организацию отвода тепла из зоны реакции потоком окислителя — воздуха, поскольку сама реакция и сопутствующее ей тепловыделение происходят на катоде.

Всё это существенно упрощает и удешевляет конструкцию и систему управления, снижает требования к конструкционным материалам и повышает надёжность ЭУ в целом.

На рис. 2 показана упрощённая схема работы ЭУ с ТЭ. В анодное пространство батареи ТЭ подаётся топливо — универсальным топливом является водород, однако ТОТЭ работают и на синтез-газе ( $H_2$  и  $CO$ ). В катодное пространство подаётся воздух. Продуктом реакции является вода и, при использовании синтез-газа, углекислый газ. Однако до наступления эры водородной энергетики, приход которой правомерно связывать с промышленным освоением термоядерной энергии, ещё долгое время предпочтительным первичным источником энергии оста-

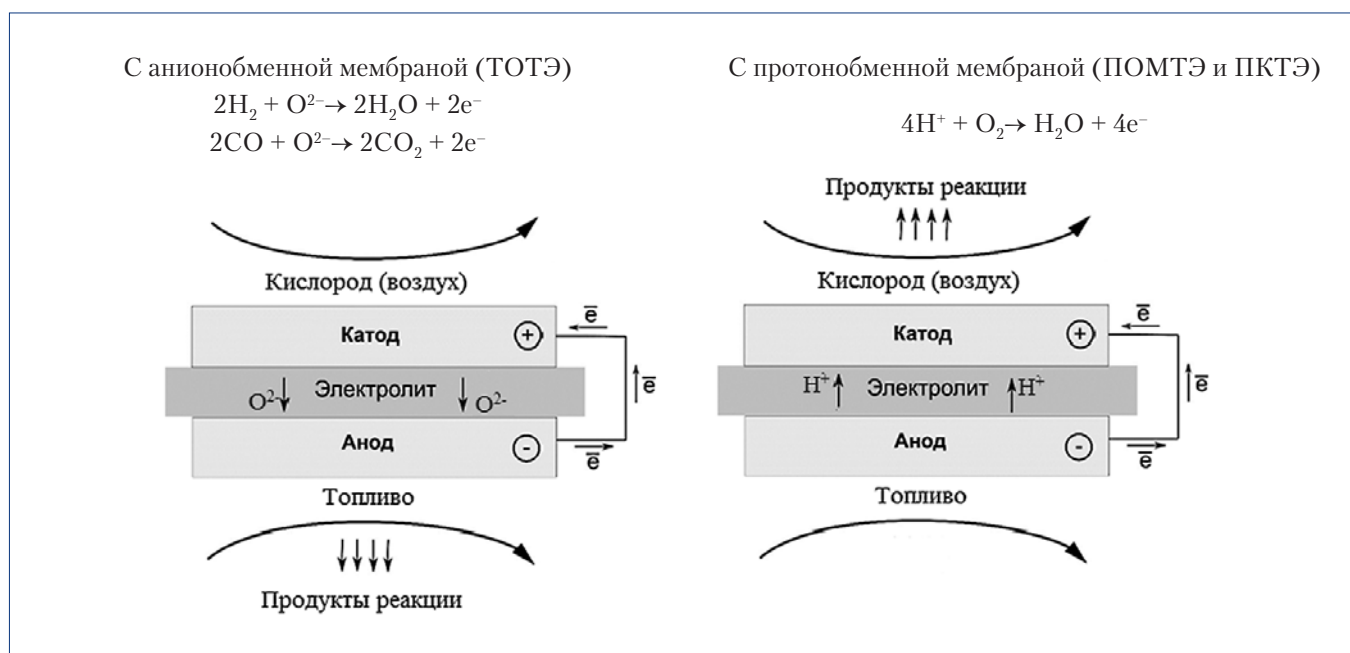


Рис. 1. Принцип действия топливных элементов с различными типами проводимости электролита

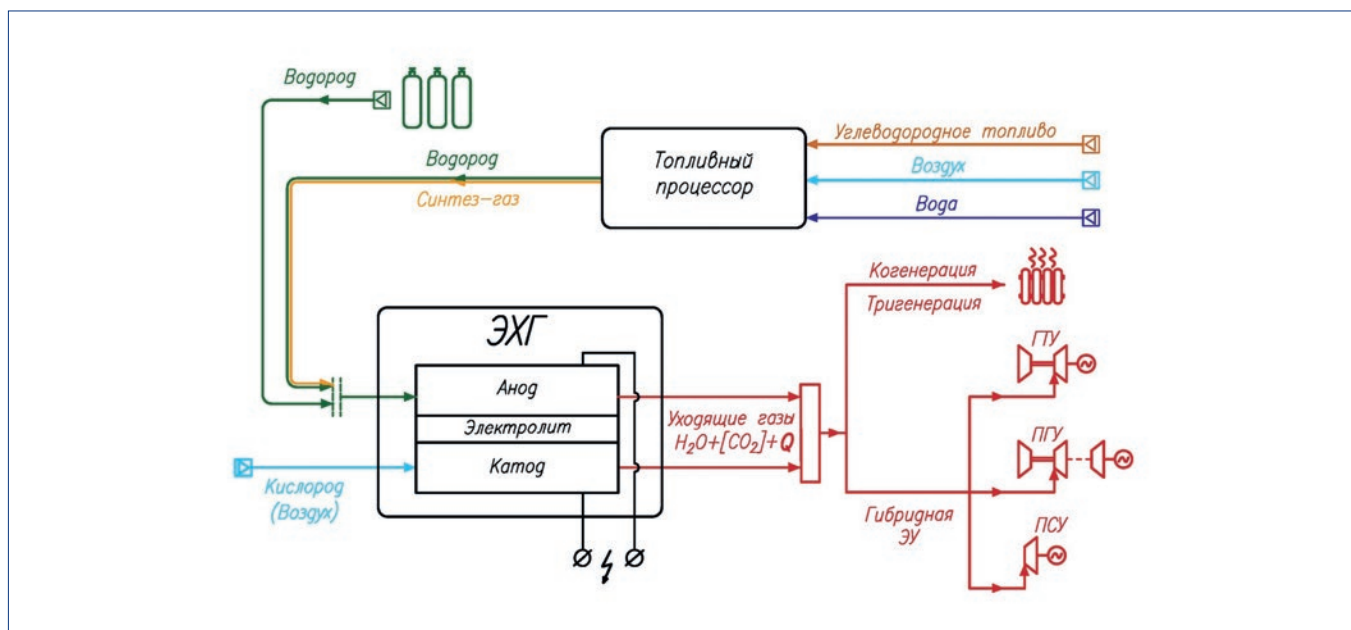


Рис. 2. Принципиальная схема ЭУ с ТЭ

нута углеводороды — газообразные, наиболее удобным из которых является метан, или жидкие. Для возможности их использования в состав ЭУ с ТЭ включаются *топливные процессоры* — каталитические реакторы, в которых исходное углеводородное топливо преобразуется в пригодное для использования в ТЭ — водород для ПОМТЭ или синтез-газ для ТОТЭ. Возможность использования синтез-газа в высокотемпературных ТЭ существенно упрощает использование углеводородных топлив: в этом случае топливный процессор состоит из одного реактора, для получения же чистого водорода — из трёх.

Реакция в топливном элементе экзотермическая, протекает с выделением тепла, которое, при

использовании высокотемпературных ТЭ, может быть утилизировано в когенерационных и тригенерационных циклах для нужд теплофикации и хладогенерации, а также в гибридных циклах с газотурбинными, паросиловыми и парогазовыми энергоустановками.

Сравнивая ЭУ с ПОМТЭ и с ТОТЭ (табл. 2) следует отметить, что ЭУ с ПОМТЭ обладают высокой эффективностью преобразования химической энергии топлива в электрическую, коротким временем пуска-останова, допускают высокую скорость изменения нагрузки в широких пределах, однако в качестве топлива могут использовать только чистый водород, что существенно усложняет кон-

Табл. 2. Сравнительные параметры ЭУ с ТОТЭ и с ПОМТЭ

ТОТЭ	ПОМТЭ
+ наиболее высокая эффективность;	+ высокая эффективность;
+ топливо – синтез-газ, возможность внутреннего риформинга углеводородов;	– топливо – водород, высокие требования к чистоте топлива; – требуется обеспечение водного баланса мембраны;
– длительное время пуска-останова;	+ короткое время пуска-останова;
– ограниченные возможности изменения нагрузки;	+ высокая скорость и широкий диапазон изменения нагрузки;
+ высокопотенциальная тепловая энергия в цикле ЭУ: <ul style="list-style-type: none"> <li>• компактная воздушная система охлаждения;</li> <li>• возможность утилизации высокопотенциальной тепловой энергии в когенерационных и гибридных циклах для риформинга углеводородов;</li> </ul>	– низкопотенциальная тепловая энергия в цикле ЭУ: <ul style="list-style-type: none"> <li>• при мощностях, начиная с нескольких киловатт, требуется более сложная и энергозатратная жидкостная система охлаждения;</li> </ul>
– сложная технология изготовления	+ относительно простая технология изготовления

струкцию топливного процессора при использовании углеводородных топлив в качестве исходных. ЭУ с ТОТЭ обладают наиболее высокой эффективностью преобразования химической энергии топлива в электрическую, а высокопотенциальная тепловая энергия уходящих продуктов реакции позволяет эффективно её утилизировать, что ещё более повышает коэффициент использования тепловой энергии топлива и электрический КПД. ТОТЭ могут использовать в качестве топлива не только водород, но и водородсодержащие газы и даже, за счёт внутреннего риформинга, непосредственно углеводородное топливо, что существенно упрощает конструкцию топливного процессора или же позволяет вовсе от него отказаться.

Перечисленные особенности определили приоритетные области применения: для ПОМТЭ это ЭУ транспортного назначения и системы резервного электропитания, где время пуска и регулирование мощности являются определяющими факторами, для ТОТЭ — ЭУ стационарного назначения, преимущественно в системах постоянного электропитания, где определяющими являются электрический КПД и коэффициент использования тепла, ресурс, возможность использования углеводородных топлив.

Особенностью ТЭ с твёрдыми электролитами, в большей степени керамическими, является ограничение размеров единичного элемента, а, следовательно, единичной мощности ТЭ. Для получения требуемой мощности единичные ТЭ собираются в батареи, батареи — в модули, модули — в электрохимические генераторы (ЭХГ), образуя в конечном счёте энергоустановку. Эта особенность оборачивается двумя достоинствами ЭУ с ТЭ: массовое производство однотипных изделий — ТЭ и батарей ТЭ — обеспечивает их высокую надёжность и снижение стоимости, а модульность конструкции позволяет уменьшать стоимость и сроки разработки мощностного ряда ЭУ за счёт отработки технологии и конструкции ТЭ и батарей ТЭ на менее затратных изделиях ограниченной мощности с последующим масштабированием мощности ЭУ путём увеличения количества ТЭ в батарее и батарей ТЭ в единичной ЭУ.

Сказанное хорошо иллюстрируется показанными на рис. 3 технологическими этапами изготовления прототипа гибридной ЭУ мощностью 1,25 МВт фирмы Mitsubishi Heavy Industries. На несущую основу (1), выполняющую кроме того функцию газораспределения и теплосъёма, наносятся мембранно-электродные блоки ТЭ (2). Полученные повторяющиеся элементы (3) собираются в батареи (4) с газовыми коллекторами, коммутирующей

и силовой арматурой, батареи соединяются в модули (5), модули — в электрохимические генераторы (6) со своим основным и вспомогательным оборудованием, сборка (7) из четырёх ЭХГ вместе с микро-ГТУ (8) образуют гибридную ЭУ (центральное изображение).

Нисколько не умаляя достижения фирмы МНН, следует отметить, что гибридные установки ЭХГ с ТОТЭ и электромеханическими преобразователями имеют смысл только в диапазоне очень больших мощностей. При КПД ЭХГ ~ 60%, исходя из термодинамики, мощность ЭХГ в 3–5 раз должна превышать мощность ЭМП при условии, что КПД последнего будет на уровне 40–50%. Таких значений КПД энергоустановки с электромеханическими преобразователями достигают при мощностях уровня десятков и сотен мегаватт. Следовательно, мощность гибридной установки должна быть уровня сотен мегаватт. При КПД ЭХГ на уровне 75% различие будет уже на порядок, поэтому по мере повышения эффективности ЭУ с ТЭ создание таких гибридных ЭУ станет скорее всего экономически неоправданным.

Для стационарной энергетики наиболее перспективной областью применения ЭУ с ТЭ на ближайшую перспективу следует считать источники питания для автономных потребителей и распределённой генерации, а в дальнейшем, по мере отработки и удешевления технологии, — объекты большой энергетики с блоками, состоящими из множества однотипных модулей ЭУ относительно небольшой единичной мощности. Причём для климатических условий России особый интерес представляют ЭУ когенерационного цикла.



Рис. 3. Этапы изготовления ЭУ на примере прототипа гибридной ЭУ с ТОТЭ и микро-ГТУ мощностью 1250 кВт фирмы Mitsubishi Heavy Industries (MHI)

В секторе малой мощности широкое применение могут получить ЭУ простого, когенерационного и тригенерационного циклов мощностью от сотен ватт до нескольких киловатт в качестве автономных источников энергии для отдалённых и труд-

нодоступных мест (трубопроводный транспорт, телекоммуникационная и дорожная автоматика) (рис. 4–6) [2–4], для индивидуальных домохозяйств (рис. 7) [5]. ЭУ мощностью до сотен киловатт могут использоваться для покрытия нагрузки небольших



а)



б)

**Рис. 4. ЭУ «Гамма» с ТОТЭ мощностью 400–600 Вт «ГК ИнЭнерджи», Россия на ГРП РС-4 «Газпром трансгаз Казань»**

а) ЭУ с буферными аккумуляторными батареями внизу, б) ГРП РС-4 «Газпром трансгаз Казань»



а)



б)

**Рис. 5. ЭУ с ТОТЭ мощностью 0,5–1,5 кВт фирмы Atrex, США**

а) на магистральном газопроводе; б) в отдалённой точке энергоснабжения автономного потребителя



а)



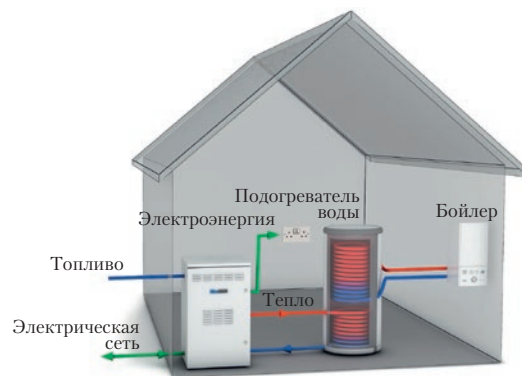
б)

**Рис. 6. ЭУ с ТОТЭ мощностью 3 кВт фирмы Sunfire, Германия**

а) ЭХГ; б) ЭУ в 10-футовом контейнере



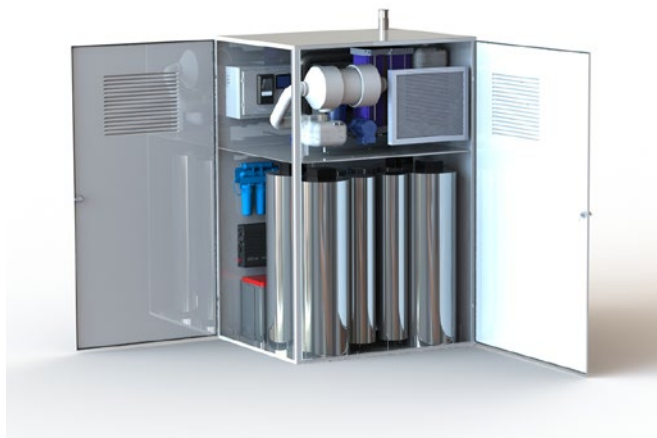
а)



б)

*Рис. 7. Когенерационная ЭУ с ТОТЭ «BlueGEN» мощностью 1,5–2,5 кВт фирмы SOLID Power, Германия – Италия – Швейцария*

*а) электрохимический генератор; б) размещение ЭУ в домохозяйстве*



*Рис. 8. ЭУ «Астра» с ПОМТЭ мощностью 20 кВт на природном газе ГК «ИнЭнерджи», Россия (проект) [2]*



*Рис. 9. ЭУ с ПОМТЭ мощностью 60 кВт на водороде фирмы Ballard, США – Канада [6]*

предприятий (рис. 8–10) [2, 6, 7] и в сфере ЖКХ. Там, где это целесообразно, единичные ЭУ могут объединяться в Smart Grid, работая параллельно между собой и/или с распределительной сетью в островном режиме.

Такие ЭУ с ТЭ могут эффективно использоваться и в качестве накопителей энергии длительного хранения для ВИЭ со стохастическим характером выработки электроэнергии (солнечных и ветровых электростанций). Для покрытия нагрузки в периоды дефицита мощности в ЭУ с ТЭ используется водород, получаемый электролизом и накапливаемый в периоды избыточной генерации ВИЭ. При этом ЭУ с ТЭ могут быть выполнены и многотопливными, способными работать также на углеводородном топливе, что позволит заменить используемые сейчас резервные и основные ДГУ, ГПУ и микро-ГТУ.

В секторе от сотен киловатт до нескольких мегаватт электростанции на базе ЭУ с ТЭ могут быть использованы для электро- и теплоснабжения промышленных предприятий, достаточно крупных объектов сферы услуг (торговых центров и др.), жилищной застройки (небольших населённых пунктов и городских районов) (рис. 11) [8].

В секторе больших мощностей — до сотен мегаватт — можно также прогнозировать связь развития крупных электростанций централизованного электротеплоснабжения на органическом топливе, а в перспективе и на водороде, с технологиями топливных элементов.

Мировой рынок ЭУ с ТЭ находится в стадии формирования и интенсивного развития — за 10 лет объёмы реализации увеличились в 18 раз. Основ-

ными центрами развития технологий ТЭ с географической точки зрения являются рынки Северной Америки, Юго-Восточной Азии (прежде всего, Китай и Япония), Западной Европы. Другие страны,

включая Россию, отнесены к категории «остальной мир». Здесь надо признаться, что по объёмам производства и потребления ЭУ с ТЭ наша страна действительно выглядит скромно, но при имеющемся



а)



б)

**Рис. 10. Когенерационная ЭУ с ТОТЭ фирмы Copvion, Финляндия [7]**

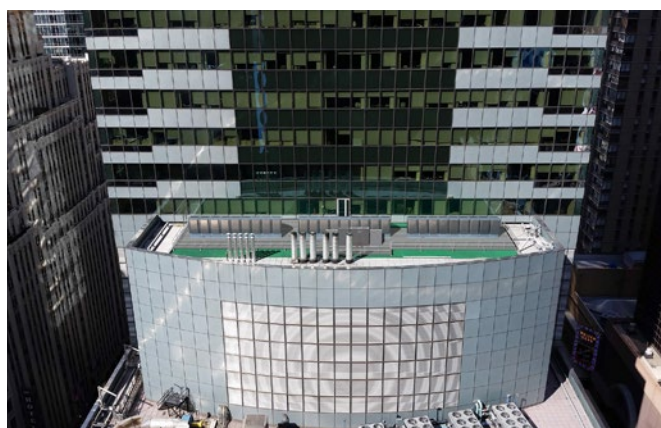
а) ЭУ мощностью 50 кВт; б) блок из трёх ЭУ мощностью 150 кВт



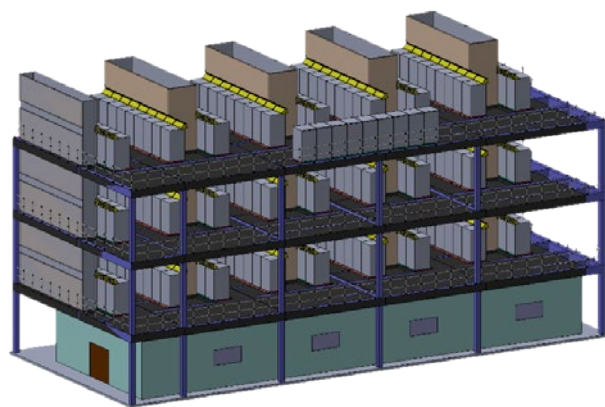
а)



б)



в)



**Рис. 11. Энергетические серверы фирмы Bloom Energy, США и электростанции на их основе [8]**

а) энергетический сервер, состоящий из энергетических модулей – ЭУ с ТОТЭ мощностью 100 кВт; б) электростанция из серверов в Data Center Walmart; в) офисная электростанция из серверов в здании Morgan Stanley, Нью-Йорк

научно-техническом потенциале нам не пристало с таким положением мириться.

В России со времён СССР разработкой ТЭ и ЭУ на их основе занимались более десятка организаций. Наиболее широко исследования и разработки в этом направлении проводились во второй половине прошлого века; в основном для космических программ, флота, в том числе подводного — это были штучные изделия, до крупномасштабного производства дело не дошло. В начале нового тысячелетия активность, в связи с сокращением финансирования, снизилась. Тем не менее можно констатировать, что в России имеются необходимые предпосылки для развития рынков производства и сбыта ТЭ:

- сохранены научно-технические школы, сформировавшиеся ещё в СССР;
- есть заделы и успешный практический опыт разработок, производства и эксплуатации ЭУ с ТЭ;
- имеются производственные мощности с необходимым оборудованием;
- существует потребность в эффективных экологически чистых многотопливных установках различного мощностного диапазона — по оценкам Института энергетических исследований РАН ёмкость российского рынка только стационарных установок до 2035 г. может составить 55 тыс. ГВт<sub>эл</sub> [1];
- государством осуществляется поддержка программы реализации технологий ТЭ, в том числе в рамках мероприятий государственной программы «Национальная технологическая инициатива».

Для развития рынка ЭУ с ТЭ в России актуальна «проблема курицы и яйца»:

- для развития рынка требуется снизить стоимость ЭУ;
- для снижения стоимости ЭУ необходимо расширение рынка.

Решение задачи видится в ступенчатом развитии глобального рынка через «нишевые» сегменты, где высокая начальная стоимость ЭУ с ТЭ компенсируется существенным снижением операционных расходов в течение всего периода эксплуатации при замене существующих источников энергии, обеспечивая тем самым конкурентоспособную стоимость жизненного цикла и развитие массового производства, что позволиткратно снизить стоимость изделий. К таким сегментам рынка можно отнести энергоснабжение потребителей в отдалённых и труднодоступных районах, в том числе в приполярных областях, нефтегазовую отрасль.

При этом пока ещё высокая стоимость ЭУ с ТЭ характеризуется низкими эксплуатационными из-

держками — установки работают в автономном режиме, мониторинг и управление осуществляются дистанционно, частота обслуживания, как правило, не превышает одного раза в год и сводится, в основном, к замене фильтров, расход топлива вдвое ниже, чем у электрогенераторов с ДВС, могут работать на более дешёвых, чем солярка, видах топлива, что, учитывая сложную логистику, можеткратно снизить эксплуатационные затраты.

Пожалуй, главное, что сейчас необходимо для развития рынка топливных элементов в России — участие квалифицированного заказчика с конкретными техническими требованиями к энергоустановкам и с потенциалом реализации продукции.

Вполне обосновано можно утверждать, что на сегодняшний день не известна иная экономически целесообразная технология преобразования энергии органического 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 надёжностью и начавшие их использование в энергетике, получают глобальные преимущества на многие годы вперёд.

Под эгидой ГК «ИнЭнерджи», имеющей собственный опыт комплексных разработок и реализации проектов ЭУ с различными типами ТЭ, сформирован консорциум отечественных организаций, способный под конкретные требования заказчика в разумные сроки разрабатывать высокоэффективные и надёжные ЭУ с ТЭ и производить их полностью — от высокотехнологичной переработки сырья для производства ТЭ до выпуска конечной продукции — в России.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. С.И. Бредихин, А.Э. Голодницкий, О.А. Дрожжин, С.Я. Истомина, В.П. Ковалевский, С.П. Филиппов//«Стационарные энергетические установки с топливными элементами: материалы, технологии, рынки». Монография. НТФ «Энергопрогресс» Корпорации «ЕЭЭК», М., 2017 г.
2. <http://www.inenergy.ru/>
3. <http://www.atrexenergy.com/>
4. <https://www.sunfire.de/en/>
5. <https://www.solidpower.com/>
6. <http://www.ballard.com/>
7. <http://convion.fi/>
8. <https://www.bloomenergy.com/>