

М. М. Бродач, канд. техн. наук, профессор МАрХИ  
Н. В. Шилкин, профессор МАрХИ

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТОПЛИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ДЛЯ ВОДОСНАБЖЕНИЯ ЗДАНИЙ

Топливные элементы представляют собой очень эффективный, надежный, долговечный и экологически чистый способ получения энергии. Первоначально применявшиеся лишь в космической отрасли, в настоящее время топливные элементы все активнее используются в самых разных областях – как стационарные электростанции, автономные источники тепло- и электроснабжения зданий, двигатели транспортных средств, источники питания ноутбуков и мобильных телефонов.

В данной статье рассмотрены два здания, в которых в качестве одного из источников энергии применяются топливные элементы, а полученная теплота используется, в частности, в системе горячего водоснабжения зданий.

Топливный элемент (электрохимический генератор) – устройство, которое преобразует химическую энергию топлива (водорода) в электрическую в процессе электрохимической реакции напрямую в отличие от традиционных технологий, при которых используется сжигание твердого, жидкого и газообразного топлива. Прямое электрохимическое преобразование топлива очень эффективно и привлекательно с точки зрения экологии, поскольку в процессе работы выделяется минимальное количество загрязняющих

веществ, а также отсутствуют сильные шумы и вибрации.

С практической точки зрения топливный элемент напоминает обычную гальваническую батарею. Отличие заключается в том, что изначально батарея заряжена, т.е. заполнена «топливом». В процессе работы «топливо» расходуется и батарея разряжается. В отличие от батареи топливный элемент для производства электрической энергии использует топливо, подаваемое от внешнего источника.

В зданиях, рассмотренных в статье, стоят достаточно большие установки, номинальной мощностью 100 и 200 кВт соответственно, при этом используется и электрическая, и тепловая энергия. Эти элементы основаны на технологии PAFC – элементы с электролитом на основе ортофосфорной кислоты (Phosphoric Acid Fuel Cells, PAFC).

В этих зданиях топливные элементы не являются единственным источником энергии, а комбинируются с внешними источниками.

### **Отель Nagoya Sakae Washington Hotel Plaza (Нагоя, Япония)**

Отель рассчитан на 308 номеров. В этом отеле действует комбинированная система производства тепловой и электрической энергии на основе топливного элемента. Использован топливный элемент FP-100 производства Fuji Electric номинальной мощностью 100 кВт.

Топливный элемент был введен в эксплуатацию в марте 1999 года и показал высокую эффективность и надежность, обеспечив снижение потребления энергоресурсов на 14%. Сжигание природного газа, необходимого для получения такого же количества энергии, увеличило бы выбросы CO<sub>2</sub> на 17%. Общий КПД установки (при комбинированном использовании тепловой и электрической энергии) превышает 70%.

В данной модели топливного элемента вырабатывается два вида тепловой энергии: высокотемпературная в виде горячей воды с температурой 90 °С и низкотемпературная в виде горячей воды с температурой 50 °С. Низкотемпературная вода, вырабатываемая топливным элементом, используется для предварительного подогрева воды, подаваемой в водонагреватель, а высокотемпературная вода используется в качестве источника тепловой энергии для отопления, кондиционирования воздуха и горячего водоснабжения.

Топливный элемент FP-100 отличается относительно низкой стоимостью и высокой надежностью. Надежность топливного элемента была увеличена путем оптимизации структуры отдельных топливных ячеек, повышения коррозионной стойкости охлаждающих труб, улучшения технологии сохранения электролита (до 40 тысяч часов работы без какого-либо добавления ортофосфорной кислоты). Для снижения стоимости был оптимизирован размер отдельных ячеек и упрощены детали каркаса. Для упрощения и снижения массы системы теплообменник предварительного подогрева

природного газа был интегрирован в состав реформера. Была оптимизирована система нейтрализации серосодержащих соединений и угарного газа. Для уменьшения эксплуатационных затрат была оптимизирована система водоочистки на основе ионообменных смол.

Габариты установки по высоте позволяют размещать ее внутри здания, а масса позволяет осуществлять транспортировку на грузовой платформе грузоподъемностью 15 тонн.

В табл. 1 приведены технические характеристики топливного элемента FP-100.

Максимальная нагрузка на систему энергоснабжения отеля составляет 250 кВт, однако во внепиковый период нагрузка падает ниже 100 кВт. Следовательно, для экономичного круглосуточного использования номинальной мощности топливный элемент должен обеспечивать передачу избыточной мощности в энергосистему и оснащаться предохранительной системой.

На рис. 1 приведена схема системы тепло- и электроснабжения данного здания. Топливный элемент подключен к газовой магистрали, а также к городской электросети через защитные устройства. Это позволяет во внепиковые часы, когда нагрузка на топливный элемент ниже номинальной, направлять избыточную электроэнергию в городскую электросеть, т.е. в это время гостиница является не потребителем, а производителем электроэнергии. Такая схема позволяет использовать топливный элемент более эффективно.

К топливному элементу подключены два водяных контура – низкотемпературный (50 °С) и высокотемпературный (90 °С). В состав обоих контуров входят насосы, теплообменники, а для охлаждения обратной воды используются градирни. Низкотемпературный контур используется для предварительного подогрева воды в составе системы горячего водоснабжения. Дальнейший нагрев осуществляется газовым водонагревателем.

Высокотемпературный контур также используется в системе горячего водоснабжения, однако он поддерживает температуру уже нагретой воды в баке-аккумуляторе. Кроме этого, высокотемпературный контур используется в качестве источника горячей воды для системы кондиционирования воздуха, в состав которой входит абсорбционный чиллер/водонагреватель с прямым использованием природного газа мощностью 350 кВт.

В процессе работы происходит непрерывный мониторинг системы тепло- и электроснабжения, что позволяет учитывать расход энергии.

Таблица 1

Основные технические характеристики топливных элементов FP-100 и PC25 Model C

| Установочная мощность (электрическая энергия) | 100 кВт  | 200 кВт  |
|---|--|--|
| Вырабатываемая электрическая энергия          | 210 В, 60 Гц, три фазы   | 480/227 В, 60 Гц, три фазы или 400/230 В, 50 Гц, три фазы  |
| Вырабатываемая тепловая энергия               | 48 кВт (172 МДж/ч) при температуре 85–90 °С; 76 кВт (272 МДж/ч) при температуре 40–50 °С   | 264 кВт·ч при температуре 60 °С или 132 кВт·ч при температуре 60 °С и 132 кВт·ч при температуре 120 °С             |
| Максимальный общий КПД                        | До 89 % (40 % – при полном использовании электрической энергии, 19 % – при полном использовании высокопотенциальной тепловой энергии, 30 % – при полном использовании низкопотенциальной тепловой энергии) |  |
| Потребляемое топливо                          | Природный газ – 22 м <sup>3</sup> /ч   | Природный газ – 57,4 м <sup>3</sup> /ч; газ из метатенка – 90 м <sup>3</sup> /ч при 60% содержании CH <sub>4</sub> |
| Выделяемые загрязнения                        | NO <sub>x</sub> < 5 ppm  | CO – < 2 ppm; NO <sub>x</sub> – < 1 ppm; SO <sub>x</sub> – незначительно   |
| Уровень шума                                  | 65 дБ (А)  | 60 дБ (А) (допускается установка внутри здания)  |
| Габаритные размеры (длина × ширина × высота)  | 3,80 × 2,23 × 2,76 м   | 3 × 3 × 5,5 м  |
| Масса   | 12 т   | 18,1 т   |

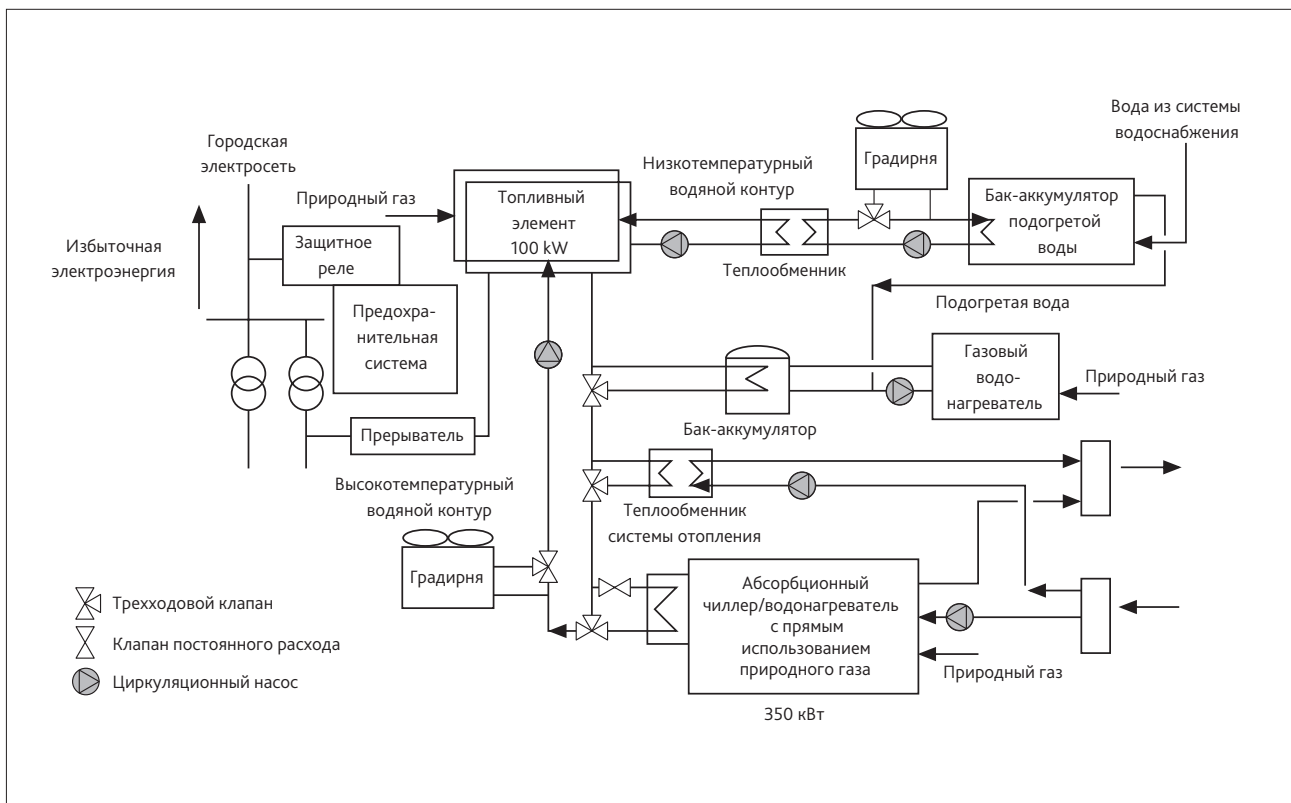


Рис. 1. Схема системы тепло- и электроснабжения здания отеля с топливным элементом FP-100

Расход электрической энергии относительно велик и даже во внепиковые часы превышает номинальную мощность топливного элемента. Высокотемпературная тепловая энергия, используемая в качестве источника тепла в системе горячего водоснабжения и как источник горячей воды для абсорбционных чиллеров/нагревателей, практически полностью расходуется равномерно в течение суток. Низкотемпературная тепловая энергия используется для горячего водоснабжения во внепиковые часы.

Использование в данной гостинице топливного элемента позволило снизить затраты на тепло- и электроснабжение примерно на 40%. Однако капитальные затраты и расходы на техническое обслуживание в два-три раза выше, чем при использовании традиционных схем энергоснабжения.

#### **Больница базы военно-морской авиации (Джексонвилль, США)**

В 1993–1994 годах Конгресс США выделил финансовые средства для исследований в области использования природного газа. Часть этих средств была направлена на реализацию демонстрационной программы применения топливных элементов Министерства обороны США «DoD Fuel Cell Demonstration Program».

В рамках этой программы планировалось приобретение, установка и последующий мониторинг в процессе эксплуатации топливных элементов на 30 объектах, принадлежащих военному ведомству: в госпиталях, учебных центрах, административных зданиях и т.д. Была разработана методология выбора и оценки применения таких установок. Эта работа включала в себя контроль изготовления и установки оборудования на обслуживаемом объекте, мониторинг работы оборудования, эксплуатацию топливных элементов.

В результате после проведения научных исследований в 1997 году серийно выпускаемые (коммерчески доступные) электростанции на топливных элементах были установлены на 29 объектах, принадлежащих Министерству обороны США, одним из которых стал госпиталь базы военно-морской авиации Jacksonville (Джексонвилль, Флорида). В качестве одного из источников энергии был использован топливный элемент PC25 Model C производства ONSI Corporation (сейчас United Technologies, Inc.). Этот элемент относится к типу PAFC. Технические характеристики этого элемента приведены в табл. 1.

Госпитальный комплекс авиабазы предназначен для обслуживания военнослужащих и вольнонаемного персонала. Он состоит из девяти зданий. Одно из них – восьмизэтажное здание больницы, в котором была проведена реконструкция. Возраст здания на момент реконструкции – 30 лет.

Площадь больницы составляет 31680 м<sup>2</sup>. Первоначально больница была рассчитана на 400 мест, однако позднее большая часть палат была преобразована в медицинские кабинеты, предназначенные для обслуживания амбулаторных больных, и в настоящее время вместимость больницы составляет 50 пациентов. Больница функционирует круглосуточно, однако пиковая нагрузка на систему энергоснабжения приходится на будни с 7:30 до 16:30. Здание больницы выполнено из железобетонных конструкций. Остальные здания госпитального комплекса – новое здание амбулатории площадью 8360 м<sup>2</sup>, административные здания и казармы.

Электроснабжение госпитального комплекса осуществляется от городской высоковольтной электросети (напряжение 4,16 кВ, подключается через трансформаторную подстанцию). Внутри комплекса используются две электросети – 480 и 120 В. Резервный источник энергоснабжения – два электрических генератора мощностью по 500 кВт.

Источник теплоснабжения – теплоцентраль. Наиболее крупные здания госпитального комплекса – больницы и амбулатории – различаются составом инженерного оборудования. Сопряжение с этим оборудованием топливных элементов представляло собой достаточно сложную инженерную задачу.

В здании больницы есть три основные системы – потребителя тепловой энергии. Это система горячего водоснабжения, система отопления и автоклавы для стерилизации медицинских инструментов (технологические нужды). Процесс стерилизации инструмента требует непосредственного использования перегретого пара под большим давлением, что не может быть обеспечено топливными элементами. В системе отопления здания больницы используются три контура водяного отопления, подключенных к источнику теплоснабжения (теплоцентрали) посредством пароводяных теплообменников, расположенных в различных местах. Подключение к теплообменникам топливных элементов достаточно сложно; кроме этого, отопление в рассматриваемом здании требуется в течение 3–4 месяцев в году. Наиболее эффективно

использование тепла топливных элементов в системе горячего водоснабжения (ГВС) здания.

Инженерное оборудование находится в техническом помещении, расположенном частично в здании больницы, а частично в отдельном здании, пристроенном к больнице. Часть оборудования располагается непосредственно на открытом воздухе. В техническом помещении установлены три водонагревателя, два чиллера, насосы, паропроводы и подобное оборудование. В ходе реконструкции было добавлено еще одно помещение, в котором размещается чиллер, бак-аккумулятор емкостью 5670 л. С южной стороны технического помещения, снаружи, располагается различное электрооборудование, а также два аварийных электрогенератора.

Теплоцентральный является источником тепловой энергии для отопления и горячего водоснабжения (ГВС) здания больницы, а также обеспечивает паром технологические нужды (стерилизацию хирургического инструмента). В системе ГВС для приготовления горячей воды используются три водонагревателя, два из них подогревают воду до температуры 60 °С (эта вода используется в помещениях больницы), а один – до температуры 82 °С (для кухни).

Расчетная температура отопительного периода – 0 °С, температура периода охлаждения – 34 °С.

Система отопления – водяная. Источник тепловой энергии – пар от теплоцентрали. Три пароводяных теплообменника размещены в здании больницы. Температура подаваемой воды – от 49 до 82 °С, температура обратной воды – от 43 до 77 °С в зависимости от температуры наружного воздуха. Система отопления используется с конца ноября до середины марта.

Топливный элемент смонтирован на открытом воздухе у восточной стены технического помещения, в котором расположен чиллер и бак-аккумулятор. Такое размещение позволяет минимизировать длину коммуникаций: длина трубопровода горячей воды составляет примерно 20 м, длина электрического силового кабеля примерно 18 м. Первоначально планировалось подведение природного газа от демонтированной мусоросжигательной печи, и длина газовой магистрали должна была составлять 45 м, однако затем удалось уменьшить длину газовой магистрали до 9 м (рис. 2).

Электрическая энергия, вырабатываемая в топливном элементе, подается в больничную электросеть при напряжении 480 В через панель управления, расположенную в техническом помещении. Выходная мощность топливного

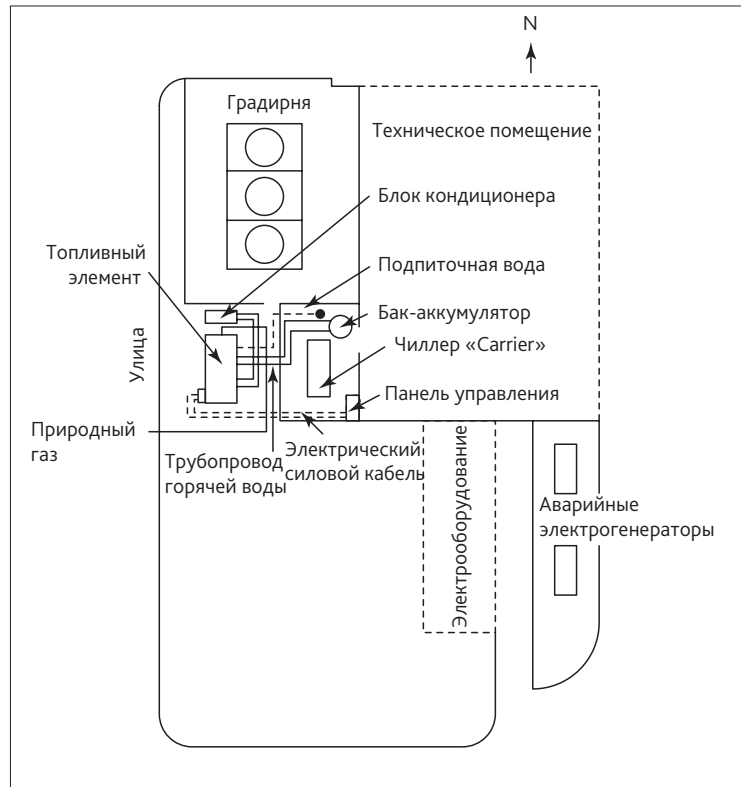


Рис. 2. Схема размещения топливного элемента и коммуникаций в больнице авиабазы

элемента составляет 200 кВт. По расчетам этого достаточно для нормального функционирования здания больницы (пиковая нагрузка составляет 1,2 МВт), однако в случае превышения максимальной нагрузки или в случае аварийной ситуации здание больницы может быть подключено к основной системе электроснабжения базы посредством трансформатора (2500 кВ·А).

Горячая вода подается в палаты, и туалеты (температура воды составляет 60 °С), и на кухню (температура воды 82 °С). Водоразборная арматура в палатах и туалетах оснащена встроенной защитой от ожогов слишком горячей водой. В соответствии с рекомендациями ASHRAE, суточная потребность в горячей воде палат оценивается в 70 л на одно койко-место. В среднем ежедневно в больнице находятся 45 пациентов, и расчетная нагрузка на систему горячего водоснабжения палат и туалетов составляет около 5,9 кВт. Суточная потребность в горячей воде кухни оценивается в 9 л на приготовление одной порции пищи, а в сутки готовится около 600 порций. Расчетная нагрузка на систему горячего водоснабжения кухни составляет 13,2 кВт. Таким образом, общая тепловая нагрузка относительно невелика, однако экономический эффект от

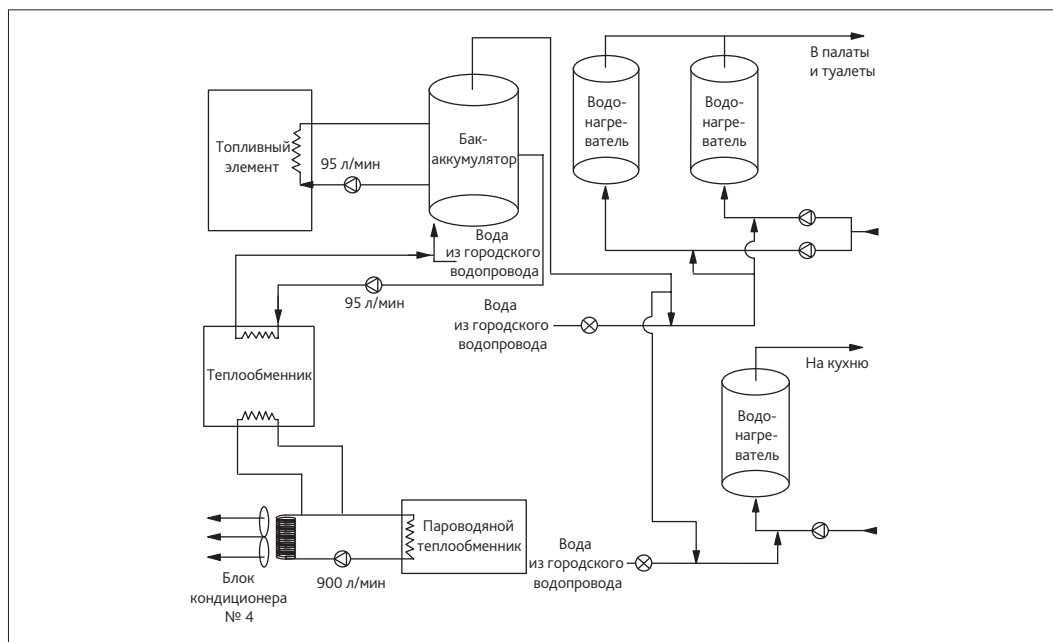


Рис. 3. Схема системы тепло- и энергоснабжения больницы на основе топливного элемента PC25 Model C

использования топливного элемента достаточно высок в связи с высокой стоимостью выработки пара в теплоцентрали. Топливный элемент вырабатывает воду с температурой 60 °С, поэтому перед подачей воды на кухню ее дополнительно подогревают до температуры 82 °С.

Топливный элемент полностью покрывает нагрузку на систему горячего водоснабжения палат и туалетов и на 80 % – нагрузку на систему горячего водоснабжения кухни (рис. 3).

Поскольку выработка электрической и тепловой энергии в топливном элементе происходит непрерывно, а потребление горячей воды на бытовые нужды носит переменный характер, в системе горячего водоснабжения предусмотрен бак-аккумулятор. Проектировщики использовали существующий бак-аккумулятор, до реконструкции задействованный в системе холодоснабжения больницы. Высота бака-аккумулятора составляет 2,1 м, диаметр – 1,8 м, вместимость – 5670 л. Для циркуляции воды между баком-аккумулятором и топливным элементом используется циркуляционный насос производительностью 95 л/мин, который должен работать все время, пока топливный элемент используется. Из бака-аккумулятора подогретая вода подается в водонагреватели, а оттуда раздается в палаты, туалеты и кухню. Возможна подача воды из городского водопровода непосредственно в водонагреватели в случае, когда топливный элемент не функционирует.

Блок кондиционера № 4, расположенный в техническом помещении, представляет собой секцию нагрева, которая обеспечивает теплым воздухом первый и второй этажи здания больницы. В период охлаждения (с середины марта до середины октября) подогретый воздух смешивается с охлажденным воздухом для обеспечения более комфортной температуры. В отопительный период (с середины октября до середины марта) подогретый воздух используется для дополнительного обогрева помещений. В летний период пароводяной теплообменник позволяет подавать на отопительный змеевик воду с температурой от 38 до 49 °С (обычно 43 °С). В зимний период температура воды, подаваемой на отопительный змеевик, составляет 66–71 °С. Температура обратной воды на 5–10 °С ниже. Вода от пароводяного теплообменника подается на отопительный змеевик посредством циркуляционного насоса производительностью 900 л/мин. Полная отопительная нагрузка на этом кондиционере составляет 345,8 кВт. Доля используемого тепла, выработанного топливным элементом, составляет 56 %.

Без учета стоимости амортизации оборудования годовая экономия энергии в стоимостном выражении составляет \$90 тыс. При 100 %-ном использовании тепловой энергии, вырабатываемой в топливном элементе, эта цифра может составить \$126 тыс. в год.

## ИСТОРИЯ И СОВРЕМЕННОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТОПЛИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Принцип действия топливных элементов был открыт в 1839 году. Английский ученый Уильям Гроув (William Robert Grove, 1811–1896) обнаружил, что процесс электролиза – разложения воды на водород и кислород посредством электрического тока – обратим, т.е. водород и кислород можно объединять в молекулы воды без горения, но с выделением тепла и электрического тока. Прибор, в котором удалось провести такую реакцию, Гроув назвал газовой батареей (gas battery), которая представляла собой первый топливный элемент.

Активное развитие технологий использования топливных элементов началось после Второй мировой войны, и связано оно с аэрокосмической отраслью. В это время велись поиски эффективного и надежного, но при этом достаточно компактного источника энергии. В 1960-х годах специалисты НАСА (National Aeronautics and Space Administration, NASA) выбрали топливные элементы в качестве источника энергии для космических кораблей программ «Apollo» (пилотируемые полеты к Луне), «Apollo-Soyuz», «Gemini» и «Skylab». На корабле «Apollo» были использованы три установки мощностью 1,5 кВт (пиковая мощность 2,2 кВт), использующие криогенный водород и кислород для производства электроэнергии, тепла и воды. Масса каждой установки составляла 113 кг. Эти три ячейки работали параллельно, но энергии, вырабатываемой одной установкой, было достаточно для безопасного возвращения. В течение 18 полетов топливные элементы наработали в общей сложности 10 000 часов без каких-либо отказов. Топливные элементы применяются в космических кораблях многоразового использования «Space Shuttle» (три установки мощностью 12 Вт, которые вырабатывают всю электрическую энергию на борту космического корабля). Вода, получаемая в результате электрохимической реакции, используется в качестве питьевой, а также для охлаждения оборудования.

В нашей стране также велись работы по созданию топливных элементов для использования в космонавтике. Например, топливные элементы применялись для энергоснабжения советского корабля многоразового использования «Буран».

Разработки методов коммерческого использования топливных элементов начались в середине 1960-х годов. Эти разработки частично финансировались государственными организациями.

В настоящее время развитие технологий применения топливных элементов идет в нескольких направлениях. Это – создание стационарных

электростанций на топливных элементах (как для централизованного, так и для децентрализованного энергоснабжения), энергетических установок транспортных средств (созданы образцы автомобилей и автобусов на топливных элементах, в том числе и в нашей стране), а также источников питания различных мобильных устройств (портативных компьютеров, мобильных телефонов и т.д.).

Одной из первых коммерческих моделей топливных элементов, предназначенных для автономного тепло- и электроснабжения зданий, стала модель PC25 Model A производства компании ONSI Corporation (сейчас United Technologies, Inc.). Этот топливный элемент номинальной мощностью 200 кВт относится к типу элементов с электролитом на основе ортофосфорной кислоты (Phosphoric Acid Fuel Cells, PAFC). Цифра «25» в названии модели означает порядковый номер конструкции. Большинство предыдущих моделей были экспериментальными или испытательными образцами, например модель PC11 мощностью 12,5 кВт, появившаяся в 1970-х годах. В новых моделях увеличивалась мощность, снимаемая с отдельной топливной ячейки, а также уменьшалась стоимость киловатта произведенной энергии. В настоящее время одной из самых эффективных коммерческих моделей является топливный элемент PC25 Model C. Как и модель «А», это полностью автоматический топливный элемент типа PAFC мощностью 200 кВт, предназначенный для установки непосредственно на обслуживаемом объекте в качестве автономного источника тепло- и электроснабжения. Такой топливный элемент может устанавливаться снаружи здания. Внешне он представляет собой параллелепипед длиной 5,5 м, шириной и высотой 3 м, массой 18 140 кг. Отличие от предыдущих моделей – усовершенствованный реформер и более высокая плотность тока.

В некоторых типах топливных элементов химический процесс может быть обращен: при подаче на электроды разности потенциалов воду можно разложить на водород и кислород, которые собираются на пористых электродах. При подключении нагрузки такой регенеративный топливный элемент начнет вырабатывать электрическую энергию.

Перспективное направление использования топливных элементов – использование их совместно с возобновляемыми источниками энергии, например с фотоэлектрическими панелями или ветроэнергетическими установками. Такая технология позволяет полностью избежать загрязнения атмосферы.