

ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ УСТАНОВКА МОЩНОСТЬЮ 0,4—1 кВт С ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИМ ГЕНЕРАТОРОМ НА ТВЕРДООКСИДНЫХ ТОПЛИВНЫХ ЭЛЕМЕНТАХ

С.М. Доросев, И.В. Казанцева

Российский федеральный ядерный центр —
ВНИИ технической физики имени академика Е.И. Забабахина, г. Снежинск

Приведено описание конструкции энергетической установки электрической мощностью 0,4—1 кВт с электрохимическим генератором на ТОТЭ.

При анализе конструкции ЭХГ были выделены технические решения, обладающие оригинальностью и новизной, которые защищены заявкой на выдачу патента РФ, заявитель — РФЯЦ — ВНИИТФ.

Расчетным путем подтверждена работоспособность элементов ЭХГ. Были проведены следующие расчеты: расчет разогрева электрохимического генератора, расчет моделирования течения газовых потоков, расчет эжектора горелки.

Проведены испытания и исследования макетов и элементов ЭХГ.

Энергетическая установка электрической мощностью 0,4—1 кВт с электрохимическим генератором на ТОТЭ разработана как источник питания существующих станций катодной защиты газотрубопроводов, телеметрии, контрольно-измерительной аппаратуры и средств связи для существующих объектов предприятий ОАО "Газпром". Данная ЭУ может использоваться различными электропотребителями в промышленности, сельском и других отраслях хозяйственной деятельности при обеспечении природным газом или чистым метаном. В зонах децентрализованного энергоснабжения — для создания современного уровня тепло- и электроснабжения населения и производства. Перспективным является применение ЭУ в транспортных средствах: электромобилях, судах с небольшим водоизмещением и т. д.

ЭУ с ЭХГ на ТОТЭ электрической мощностью 0,4—1 кВт разработана в России впервые и не имеет аналогов.

1. ОПИСАНИЕ КОНСТРУКЦИИ ЭУ

В общем виде ЭУ на ТОТЭ может состоять из:

- батарей ТОТЭ (электрохимической зоны — ЭХЗ);
- системы подготовки и подвода топлива;
- системы подготовки и подвода окислителя (воздуха);
- системы хранения и подвода инертного газа;
- системы утилизации тепла;

- системы стартового разогрева;
- системы обезвреживания (доокисления, очистки) уходящих газов;
- системы автоматики;
- системы термостатирования, теплогазообмена;
- системы защиты от несанкционированного доступа и др.

В зависимости от требований заказчика и мощности установки некоторые системы могут отсутствовать (система утилизации тепла и др.), быть комбинированными, иметь общие элементы, управление, питание (электрохимический генератор, включающий взаимозависимые эндо– и экзотермические функциональные блоки; блок газовой разводки, включающий элементы ряда систем), иметь варианты исполнения (система стартового разогрева: электроразогрев, разогрев встроенной газовой горелкой, разогрев внешней газовой горелкой с использованием пусковых блоков — теплообменных аппаратов и промежуточных теплоносителей и др.).

В соответствии с требованиями заказчика в РФЯЦ — ВНИИТФ разработана ЭУ, которая состоит из электрохимического генератора и системы автоматики (СА). ЭХГ и СА выполнены в виде отдельных функциональных блоков и конструктивно объединены в едином корпусе ЭУ.

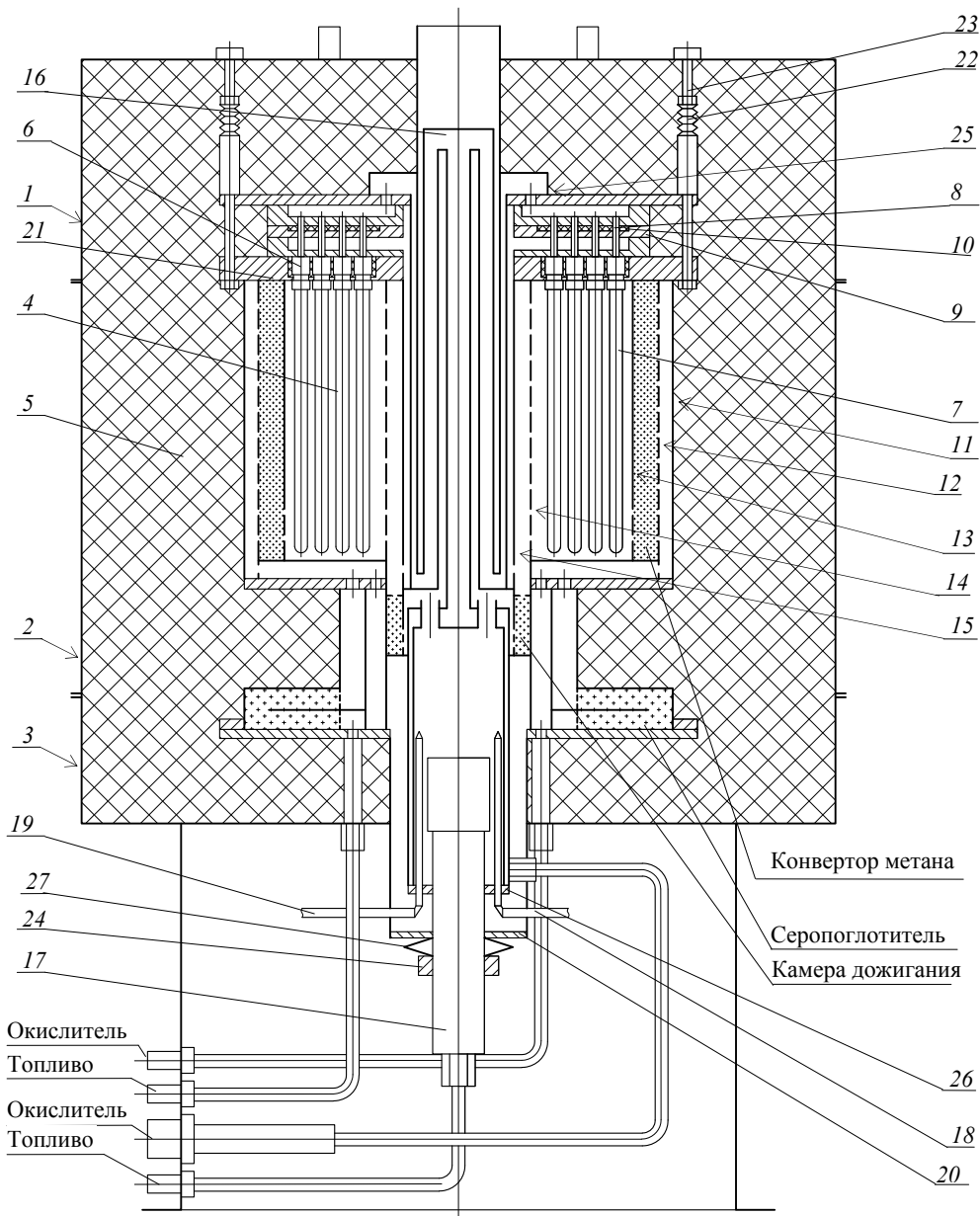
СА ЭУ — автоматические устройства, в зависимости от выполняемых функций осуществляющие: контроль и измерения, сигнализацию, защиту, управление, регулирование. СА предназначена для поджига газовой горелки ЭХГ, подачи рабочих компонентов (метана, воздуха, аргона) в ЭХЗ, поддержания рабочей температуры в ЭХЗ в заданном диапазоне, поддержания напряжения на выходе ЭУ на заданном значении, автоматической остановки ЭХГ при возникновении аварийных ситуаций. В ЭУ предусмотрены:

- автоматический контроль и измерения основных количественных и качественных показателей работы ЭУ;
- автоматическая предупредительная и аварийная сигнализация;
- автоматическая защита (автоматика безопасности) ЭУ;
- автоматическое управление пуском и остановкой различных двигателей и приводов, запуск в работу отдельных узлов. При этом устройства автоматического управления являются полуавтоматическими и могут приводиться в действие оператором.

СА состоит из двух частей: пневмогазовой и электрической. Пневмогазовая часть СА конструктивно выполнена в виде блока газовой разводки и состоит из газовой и воздушной магистралей, в состав которых входят элементы автоматики: воздуходувка, фильтры, регуляторы давления и расхода, электроклапаны, сигнализаторы давления, ресивер, вентили, дроссели. Электрическая часть СА включает аккумуляторные батареи для питания СА в режиме запуска и остановки, термопреобразователи, устройство поджига, датчик пламени, усилитель сигналов термопреобразователей и датчика пламени, блок управления, коммутирующее устройство, элементы ручного управления.

На этапе опытно–промышленной эксплуатации запуск ЭУ осуществляется с использованием малогабаритного пульта контроля и управления, который

поставляется в комплекте с ЭУ. Один пульт может использоваться для нескольких ЭУ. С помощью малогабаритного пульта осуществляется поджиг газовой горелки ЭХГ, визуальный контроль основных параметров ЭХГ в процессе стартового разогрева, запуска и выхода на рабочий режим, а также определение аварийных ситуаций, приводящих к останову ЭХГ.



Электрохимический генератор

Электрохимический генератор (рисунок) представляет собой металлический цилиндрический корпус, состоящий из трех частей (1, 2, 3), внутри которого расположен модуль ЭХГ (4), окруженный теплоизоляционным материалом (5). Основной частью модуля ЭХГ (4) является секционированная батарея (6), которая состоит из 147 ТОГЭ (7) в форме пробирок. Внутри ТОГЭ находятся трубки для подачи воздуха (8), закрепленные в диске (9) через уплотнительный материал (10). Батарея установлена в сборно–сварной корпус ЭХЗ в виде цилиндра, состоящего из пяти обечаяек (11–15). Между обечайками (12 и 13) находится конвертор метана. По оси модуля ЭХГ расположен теплообменник (16), в нижней части которого находится горелка эжекторного типа (17), закрепленная на диске (18). Здесь же установлены датчик пламени (19) и элемент поджига (20).

Сборка и герметизация батареи (6) с корпусом (21) осуществляется с использованием шпилек (22) и упругих элементов (23). Сборка и герметизация модуля ЭХГ осуществляется с использованием гайки (24) и фланцев (25, 26) теплообменника (16) и упругих элементов (23, 27).

Ожидаемые характеристики ЭУ приведены в таблице.

Ожидаемые характеристики ЭУ

Характеристика	Величина
Электрическая мощность, кВт	0,4—1
Напряжение, В	24
Род тока	постоянный
Расход природного газа (метана), м ³ /ч	до 0,4
Габаритные размеры, мм	1185 × 740 × 1480

2. ОСНОВНЫЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ ЭХГ

При анализе конструкции ЭХГ были выделены следующие технические решения, обладающие оригинальностью и новизной:

- конструкция ЭХГ;
- способ стартового разогрева ЭХГ.

В процессе патентных исследований установлено, что эти технические решения обладают мировой новизной и могут быть защищены патентами. Оригинальность и новизна заключается в следующем:

- конвертор выполнен охватывающим боковую поверхность модуля ЭХГ; в модуле ЭХГ имеется осевое отверстие, в котором с помощью цилиндрических перегородок выполнены независимые каналы для сбора отработанных топлива и воздуха в камере дожигания и для вывода продуктов сгорания через выхлопной канал;
- основная часть трубопровода подачи рабочей воздушной смеси выполнена в виде теплообменника и размещена в осевом отверстии модуля ЭХГ;

- ЭХГ снабжен контуром отдачи тепла, выполненным в боковой теплоизоляции, и управляемой газовой горелкой, сообщаемой через осевой канал с контуром отдачи тепла;
- контур отдачи тепла выполнен в виде сообщающихся коаксиальных цилиндрических проточек, при этом входная ветвь контура соединена с каналом вывода продуктов сгорания, а выходная ветвь контура — с выхлопным каналом;
- продукты сгорания газа горелки используются для нагрева воздуха, продуваемого через теплообменник к внутренним поверхностям ТОТЭ.

На перечисленные технические решения подана заявка на выдачу патента РФ, заявитель РФЯЦ — ВНИИТФ.

3. РАСЧЕТНОЕ ОБОСНОВАНИЕ И ИСПЫТАНИЯ МАКЕТОВ И ЭЛЕМЕНТОВ ЭХГ

Технические решения, используемые в ЭХГ, явились основой для проведения в РФЯЦ — ВНИИТФ ряда расчетов, которые подтверждают и обосновывают работоспособность ЭУ.

Для определения расходов метана как горючего компонента горелки и воздуха как теплоносителя в катодном тракте трубчатых ТОТЭ проведен расчет разогрева электрохимического генератора. В качестве исходных данных и граничных условий для расчета были взяты конструкция и материалы теплообменников, электрохимической зоны ЭХГ, теплопроизводительность горелки, время и скорость разогрева ЭХЗ до заданной температуры. Расчет подтверждает, что при определенном расходе воздуха в окислительном тракте и при заданной теплопроизводительности горелки конструкция ЭХГ реализует выбранный способ стартового разогрева. В расчете определены оптимальные параметры расходов газов, которые позволяют избежать высокой скорости нагрева ТОТЭ и уменьшить разнотемпературность как по высоте ТОТЭ, так и в целом по объему ЭХЗ.

Для проверки обеспечения равномерной раздачи газа по окружности и высоте ЭХЗ и с целью определения режимов продувки проведен расчет моделирования течения газовых потоков. Расчет произведен для макета ЭХЗ исходя из конструктивных размеров штатной ЭХЗ; при этом топливная смесь заменена воздухом с комнатной температурой. Так как течение газов в макете не может быть полностью подобным течению в реальной ЭХЗ, то для расчета режимов продувки макета в качестве критериев подобия рассматривались кинетическая энергия потоков и потеря давления в тракте. Расчет определены оптимальные расходы воздуха, как имитатора топливной смеси и катодного воздуха, оптимальные размеры зерна засыпки и отверстий перфорации оболочек. При выбранных параметрах показана достаточность гидравлического сопротивления для выравнивания расхода воздуха по высоте имитатора конвертора. На основании расчетов разработан макет ЭХЗ, позволяющий проверить смоделированное течение топливной смеси в ЭХЗ и перемешивание ее с воздухом окислительного тракта в зоне дожигания.

В рамках работ по реализации стартового разогрева ЭХГ разработаны два варианта конструкции горелки эжекторного типа. Первый вариант разработан с использованием стандартной методики расчета. Во втором варианте предусмотрена околокритическая скорость потока метана в эжекторе. Расчет эжектора горелки для разогрева ЭХГ подтвердил достижение величины противодавления, достаточной для обеспечения стартового разогрева ЭХГ. Были определены оптимальные диаметры сопла и смесительной камеры исходя из максимума давления за диффузором камеры и теплопроизводительности горелки. Показана зависимость давления в смесительной и диффузорной камерах от диаметров сопла, смесительной камеры и диффузора при заданных величинах критической скорости потоков газов, коэффициента избытка эжектируемого воздуха, температур газов, объемных расходов и трения газов. По первому варианту конструкции изготовлен макет горелочного блока, на котором проверены элементы системы автоматики и возможность дистанционного управления.

Кроме того, проведены продолжительные испытания ТОТЭ с измерением электрических характеристик. Фактическое время испытания составило 160 часов. Средняя температура при измерении электрических характеристик составляла 950 °С. По результатам испытаний электрические характеристики ТОТЭ были стабильны во времени и не ухудшились в течение 160 часов испытаний. Удельные характеристики, полученные при температуре 960 °С, составили:

- плотность мощности — 61,4 мВт/см²;
- плотность тока — 135,6 мА/см².

При испытаниях новых составов электродов и отработке технологии их нанесения была достигнута величина мощности единичного ТОТЭ 5,5 Вт. Разработанный технологический процесс изготовления ТОТЭ стабильно обеспечивает данный уровень мощности в процессе изготовления мелкосерийной партии топливных элементов. Поэтому в качестве расчетной величины мощности единичного ТОТЭ в конструкции ЭХГ мощностью 1 кВт была принята величина 5 Вт.

Проведены испытания заготовок пробирок из диоксида циркония, предназначенных для изготовления ТОТЭ. Цель испытаний — определение фактических значений разрушающих нагрузок при изгибе заготовок. По результатам испытаний была определена допустимая величина изгибающего усилия, используемая при разрушающем контроле качества изготовления керамических заготовок.

Проведена отработка технологии пайки ТОТЭ с керамической втулкой. Установлено, что паяное соединение выдерживает без потери герметичности не менее 10 термоциклов: нагрев до 1000 °С, выдержка 15 минут и охлаждение до комнатной температуры.

Проведены исследования сварки сталей 20Х23Н18 и 10Х23Н18 применительно к изготовлению макетов корпуса и теплообменника ЭХГ. Установлено, что проведенное термоциклирование — выдержка в течение 2 часов в печи с $T = 1000$ °С, охлаждение на воздухе (3 цикла) — не привело к потере герметичности сварных соединений.

Кроме перечисленных испытаний и исследований проводится проверка конструктивных решений элементов герметизации ЭХГ на температурном макете.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В РФЯЦ — ВНИИТФ разработана конструкция ЭУ электрической мощностью 0,4—1 кВт с ЭХГ на ТОТЭ.

ЭУ данного типа разработана в России впервые и не имеет аналогов.

На основные технические решения, используемые в ЭУ, подана заявка на выдачу патента РФ, заявитель — РФЯЦ — ВНИИТФ.

Расчетным путем подтверждена работоспособность элементов ЭХГ.

Проведены испытания и исследования макетов и элементов ЭХГ.

Результаты расчетных и экспериментальных работ демонстрируют возможность изготовления полномасштабного лабораторного образца разработанной ЭУ и позволяют надеяться на его успешную опытно-промышленную эксплуатацию.