

УДК 620.92

DOI: 10.24160/1993-6982-2020-4-42-48

## Методика расчёта режимов электрохимических энергоустановок с твёрдооксидным электролитом

Р.С. Цгоев

Энергоустановки на топливных элементах (ЭУ/ТЭ) рассматриваются в качестве одной из ключевых технологий энергетики будущего. Наравне с машинными технологиями электрогенерации (газотурбинными, дизель-генераторными и парогазовыми установками, установками с двигателем Стирлинга и др.) они также могут использоваться в когенерационных установках, реализующих процесс совместной выработки электрической и тепловой энергии. Областью применения топливных элементов в России может стать распределённая электрогенерация, включая автономное энергоснабжение потребителей на базе сетевого и сжиженного природного газа, сжиженных углеводородных газов, а также возобновляемых источников энергии, особенно в когенерационных режимах.

Предложена методика расчёта режимов энергоустановки на топливных элементах в предположении, что входящие в состав топлива горючие элементы полностью окисляются, превращаясь в инертные газы. Определение расхода продуктов до и после реакций, соответственно на входе и на выходе ЭУ/ТЭ, основано на использовании метода материального баланса. Расчёт материального и энергетического балансов топливных элементов выполнен на примере ЭУ/ТЭ типа SOFC с твёрдооксидным электролитом при прямой внутренней конверсии метана, а также при работе на чистом водороде в комплексе с ветроэнергетической установкой. Оценена возможность аккумулирования энергии в накопителях водорода.

Учитывая самые высокие электрический и когенерационный КПД, перспективными для когенерационной электроэнергетики считаются твёрдооксидные ЭУ/ТЭ с использованием в качестве топлива (восстановителя) природного газа (метана) и в качестве окислителя — атмосферного кислорода (воздуха). Определён необходимый расход метана и воздуха в предположении 21%-го содержания в нём кислорода. Расчет потенциальной мощности топлива проведён при электрической мощности установки 15 МВт и тепловой нагрузке — 6 МВт в когенерационном режиме. Указанная тепловая мощность через сетевой подогреватель СП отводится от блока топливных элементов ЭУ/ТЭ для дальнейшего использования. Накопитель водорода может быть выполнен в виде газгольдера или баллонного типа. Очевидно, что системы хранения газообразного водорода под давлением просты и не требуют специального оборудования для извлечения газа из хранилища.

*Ключевые слова:* энергоустановки на топливных элементах, внутренняя конверсия метана, материальный и энергетический балансы, распределённая электрогенерация.

*Для цитирования:* Цгоев Р.С. Методика расчёта режимов электрохимических энергоустановок с твёрдооксидным электролитом // Вестник МЭИ. 2020. № 4. С. 42—48. DOI: 10.24160/1993-6982-2020-4-42-48.

## A Procedure for Calculating the Operation Modes of Electrochemical Power Installations with Solid Oxide Electrolyte

R.S. Tsgoev

Fuel cell power plants (FCPPs) are considered as one of the key future energy technologies. Along with machine-based power generation technologies (gas turbine units, diesel generator sets, combined cycle plants, Stirling engine plants, etc.), FCPPs can also be used in cogeneration plants for combined generation of electricity and heat. Fuel cells can find use in Russia for distributed electricity generation, including autonomous power supply to consumers based on the use of pipeline and liquefied natural gas, liquefied hydrocarbon gases, as well as renewable energy sources, especially in cogeneration modes of operation. A procedure for calculating the operation modes of a fuel cell power plant is proposed, assuming that the combustible elements contained in the fuel are fully oxidized, transforming into inert gases. The flowrates of products before and after the reactions at the FCPP inlet and outlet are determined by using the material balance method. The material and energy balances of fuel cells are calculated taking as an example an SOFC-type FCPP with a solid oxide electrolyte for direct internal conversion of methane and also during operation on pure hydrogen in a combination with a windmill. The possibility of storing energy in hydrogen storage devices is estimated. In view of their highest electric and cogeneration efficiencies, solid oxide FCPPs using natural gas (methane) as fuel (reducing agent) and atmospheric oxygen (air) as oxidizer are considered to be promising ones for cogeneration-type electric power sources. The required methane and air flowrates are determined assuming that the oxygen content in air is equal to 21%. The potential fuel capacity was calculated for the installation's electric power equal to 15 MW and its heat load in the cogeneration mode equal to 6 MW. This thermal power is removed from the FCPP fuel cell unit through a delivery water heater for its further use. The hydrogen storage device can be made as a gas tank or a gas cylinder. Obviously, pressurized gaseous hydrogen storing systems are simple and do not require special equipment for retrieving gas from the storage.

*Key words:* fuel cell power plants, internal methane conversion, material and energy balances, distributed power generation.

*For citation:* Tsgoev R.S. A Procedure for Calculating the Operation Modes of Electrochemical Power Installations with Solid Oxide Electrolyte. Bulletin of MPEI. 2020;4:42—48. (in Russian). DOI: 10.24160/1993-6982-2020-4-42-48.

### Введение

Энергоустановки на топливных элементах (ЭУ/ТЭ) рассматриваются в качестве одной из ключевых технологий энергетики будущего [1 — 3]. Наравне с машинными способами электрогенерации (газотурбинными (ГТУ), дизельгенераторными (ДГУ), парогазовыми (ПГУ) установками, установками с двигателем Стирлинга (УДС) и др.) они могут использоваться в когенераторах, реализующих процесс совместной выработки электрической и тепловой энергии.

По мнению авторов [1 — 3] областью применения топливных элементов в России может стать распределённая электрогенерация, включая автономное энергоснабжение потребителей на базе сетевого и сжиженного природного газа, сжиженных углеводородных газов, а также возобновляемых источников энергии, особенно в когенерационных режимах. С учётом существующих заделов и сложившейся кооперации наибо-

лее актуальной представляется концентрация усилий на развитии твёрдооксидных, твёрдополимерных топливных элементов. Значительный практический интерес может представлять использование топливных элементов с электролитом на основе расплавленного карбоната для решения актуальной проблемы утилизации свалочного газа на полигонах твёрдых бытовых отходов и полях азрации. Это следует из данных [1, 3, 4], приводимых в табл. 1.

Учитывая самый высокий электрический и когенерационный КПД, в [1 — 3] отмечается, что перспективными для когенерационной электроразработки являются твёрдооксидные ЭУ/ТЭ с использованием природного газа (метана) в качестве топлива (восстановителя) и атмосферного кислорода (воздуха) в качестве окислителя. Предложена методика расчета материального и энергетического балансов указанных компонентов в процессе реакций в топливных элементах при распределённой электрогенерации.

Таблица 1

### Технические показатели ЭУ/ТЭ [1, 3, 6]

Параметр	Тип электролита топливного элемента				
	воднощелочной (AFC)	твёрдополимерный (PEMFC)	фосфорнокислый (PAFC)	высокотемпературные:	
				с карбонатным расплавом (MCFC)	твёрдооксидный (SOFC)
КПД, %: электрический [1] с учетом когенерации [3]	50...65 —	35...50 60...65	0...50 75...80	43...50 75...85	50...60 75...85
Рабочая температура, С°	70...200	80...160	180...200	650...700	650...950
Удельная производительность, А/см <sup>2</sup>	до 1...2	до 1...2	<0,5	<0,5	<0,5
Время выхода на рабочий режим от 0 С°, ч	<0,1	<0,1	~1	1...2	>3
Время изменения мощности на 50%, с	<5	<5	<5	>10	>100
Устойчивость к вибрационным и ударным нагрузкам	+	+	+	+	—
Удельная масса, кг/кВт: достигнутая (для установки ~ 100 кВт) перспективы	<10 ~ 0,6	<10 <0,6	10...20 5...10	>20 >20	>20 >20
Удельный объем, м <sup>3</sup> /кВт: достигнутый (для установки ~ 100 кВт) перспективы	<5·10 <sup>-2</sup> ~10 <sup>-2</sup>	~10 <sup>-2</sup> <10 <sup>-2</sup>	~10 <sup>-1</sup> ~5·10 <sup>-2</sup>	>10 <sup>-1</sup> >10 <sup>-1</sup>	>10 <sup>-1</sup> >10 <sup>-1</sup>
Достигнутый ресурс, ч	20000	40000	40000	10000	30000 (при постоянном режиме работы)
Топливо	Особо чистый водород	Водород, продукты конверсии природного газа, метанола	Водород, продукты конверсии и в перспективе природный газ		
Окислитель	Особо чистый кислород	Кислород, воздух			

Планарные твёрдооксидные ТЭ применяют в крупных энергоустановках мощностью мегаваттного класса. Стратегическая цель корпорации МНН (Япония) — разработка гибридной энергоустановки электрической мощностью 100 МВт, состоящей из твёрдооксидного ЭУ/ТЭ, газовой и паровой турбин, с суммарным электрическим КПД 70% [1]. Следует отметить действующую электростанцию мощностью 59 МВт на расплав-карбонатных топливных элементах в Южной Корее. Высокая температура отходящих газов ЭУ/ТЭ позволяет использовать высокопотенциальное тепло, получаемое при их охлаждении, не только для реализации когенерационных схем, но и для нагрева рабочего тела газовых и паровых турбин. В [2] подробно описаны термодинамические циклы, реализуемые с использованием ЭУ/ТЭ, а также приведены различные схемы гибридных энергоустановок (ГЭУ/ТЭ) и расчёты их обоснования.

В установках гибридного цикла кратно большая часть энергии вырабатывается ЭУ/ТЭ, а КПД турбомашин достигает высоких значений, начиная с уровня мощности порядка десятков мегаватт, следовательно, для высокоэффективных ГЭУ/ТЭ необходимо создание ЭУ/ТЭ, превосходящих выбранный электромеханический преобразователь по мощности в 2...4 раза.

Основная масса разработок систем с топливными элементами ориентирована на использование природного газа и воздуха. Известно, что эффективный КПД двигателей внутреннего сгорания (ДВС) (отношение части тепла, превращенного в эффективную работу на валу, к общему количеству потраченного тепла) для карбюраторных и газовых ДВС, использующих бензин и природный газ, составляет 21...30%, у дизельных — 30...42%. При этом усредненная низшая теплота сгорания для различных типов бензина — 44 МДж/кг. Примерно такую же усредненную теплоту сгорания имеет природный газ (31...38 МДж/м<sup>3</sup> или 43...53 МДж/кг), например, для газа Уренгойского месторождения она составляет около 32,9 МДж/м<sup>3</sup> или 45,88 МДж/кг [3]. Отметим важный момент, что природный газ никаким качественным преобразованиям не подвергается до подачи в ДВС, а на получение бензина из нефти затрачивается определенная энергия. Поэтому, если рассматривать весь цикл «нефть – бензин – ДВС», то его КПД при прочих равных условиях будет меньше цикла «природный газ – ДВС». По-видимому, этой логике придерживаются почти все разработчики, создавая ЭУ/ТЭ на природном газе.

#### **Анализ параметров энергоустановок на топливных элементах**

Для промышленного применения сосредоточим основное внимание на пяти видах ТЭ (см. табл. 1). Для обозначения типов топливных элементов укажем общепринятые аббревиатуры. Отметим, что для AFC требуются чистые кислород и водород, а для PAFC — чистый водород, поставка которых в необходимых объемах для

покрытия мощностей зачастую проблематична, поэтому ЭУ/ТЭ следует использовать на производствах, где водород и кислород являются побочными продуктами. В то же время на большинстве предприятий по экологическим требованиям в качестве основного топлива применяется природный газ с высоким содержанием метана.

Схем реализации ЭУ/ТЭ множество [2, 3]. В таблице 1 [1, 4] наряду с другими данными приведена удельная производительность ЭУ/ТЭ (т.е. плотность тока на см<sup>2</sup> поверхности электродов). Данный показатель у ЭУ/ТЭ типа PEMFC более высокий, что в конечном итоге отражается на ее габаритах и весе. Однако на данном этапе он не является лимитирующим. При размещении же на действующих предприятиях и в быту требования к весогабаритным показателям могут проявиться более жестко. Так, ЭУ/ТЭ типа PEMFC мощностью 250 кВт (электрической) имеет размеры 7,3×2,7×2,4 м и весит 22500 кг, а установка типа MCFC мощностью 15 МВт занимает площадь теннисного корта [5].

Основная идея получения ЭУ/ТЭ большой мощности — наращивание числа надежно проработанных модулей ТЭ, причём это практически не влияет на общий КПД установки. Например, фирма M-C Power разработала проект гибридной ЭУ, полученной объединением расплав-карбонатных топливных элементов MCFC, работающих при давлении 6 атм., и ГТУ. В модуль входят реформер (блок, в котором топливо (метан) при наличии паров воды разлагается на водород и углекислый газ, т.е. реализуется уравнение  $\text{CH}_4 + 2\text{H}_2\text{O} = \text{CO}_2 + 4\text{H}_2$ ) и батарея MCFC мощностью 500 кВт. Установка содержит 36 модулей, ГТУ специально спроектирована фирмой RRA. При этом мощность ЭУ — 20,115 МВт, мощность модулей MCFC — 17,856 МВт, КПД ЭУ — 70,11%.

Фирма SWPC (Siemens/Westinghouse Power Corp.) на твердооксидных SOFC в соответствии с программой DOE (законопроект, поддерживающий повышение энергоэффективности, увеличивающий финансирование программ энергосбережения, закрепленных за Министерством энергетики США (Department of Energy USA — DOE)) на 2020 г. для когенерационных ЭУ/ТЭ электрической мощностью 0.1...3 МВт на природном газе разработала проект гибридной ЭУ/ТЭ, состоящей из двух блоков мощностью по 12,3 МВт. Каждый блок содержит ГТУ фирмы Solar Turbines и 4 модуля по 11520 единичных SOFC в каждом, рабочее давление — 9 атм., суммарная установленная мощность — 24,7 МВт при КПД 59,9%.

При постановке задачи в когенерационных режимах для использования тепла на выходе ЭУ/ТЭ должна быть возможность подключения, например, сетевых подогревателей для бытового отопления и снабжения горячей водой потребителей. Это особенно актуально при использовании ЭУ/ТЭ в распределённой энергетике. Ориентируясь на данные табл. 1, а также наиболее полные данные, приведенные в [2, 3, 6], рассмотрим режимы ЭУ/ТЭ с твердооксидным электролитом при

условии, что она или подключена к распределённой газовой сети, или работает совместно с ветроэнергетическими установкой (ВЭУ) или станцией (ВЭС).

Рассчитаем продукты реакции на входе и выходе ЭУ/ТЭ методом материального баланса. На выходе ЭУ/ТЭ помимо электрической энергии есть продукты и теплота электрохимической реакции. В таблице 1 для ЭУ/ТЭ типа SOFC даны следующие КПД: электрический — 50...60%, с учетом утилизации тепла (общий) — 75...85%. Возьмём электрический КПД в качестве минимального значения  $\eta_{ТЭ(эл)} = 50\%$ . В реальности коэффициент использования топлива в ЭУ/ТЭ может составлять 80...85%, соответственно, на 15...20% увеличатся продукты реакции. Чтобы исключить это из расчетов, примем общий КПД с учетом утилизации тепла (когенерационная схема)  $\eta_{ТЭС} = 70\%$ . При этом кроме 50% электрической мощности полезно используются 20% полной тепловой мощности топлива, а 30% идут на нагрев элементов ЭУ/ТЭ и реагентов электрохимических реакций.

Для определения продуктов до и после реакции на входе и выходе ЭУ/ТЭ воспользуемся методом материального баланса [3, 7, 8]. В природных газах, поступающих в газовые сети, практически нет пыли, а содержание влаги можно считать соответствующим насыщению при температуре и давлении в газопроводе. При давлениях газа, применяемого в промышленных установках, влагосодержанием можно пренебречь. Содержание метана в большинстве природных газов доходит до 98% и более. Природные газы Уренгойского и Ставропольского месторождений имеют в своем составе  $\text{CH}_4$  соответственно 98,4 и 98,3%, поэтому примем, что метан не имеет примесей.

Под материальным балансом окислительно-восстановительного процесса в топливном элементе понимается равенство между массами участвующих в этом процессе топлива и окислителя и образовавшихся продуктов реакции [7, 8]. При составлении материального баланса в ТЭ положим, что входящие в состав топлива горючие элементы полностью окисляются, превращаясь в инертные газы. При его подсчёте воспользуемся молекулярной массой в атомных единицах массы (а.е.м.) и плотностью газов при нормальных условиях ( $t = 0^\circ\text{C}$ ,  $p = 101,08$  кПа) из табл. 2.

В метане  $\text{CH}_4$  содержание углерода С — 74,97%, водорода  $\text{H}_2$  — 25,03%, низшая теплота сгорания  $Q_n = 8560$  ккал/м<sup>3</sup> (35,93 МДж/м<sup>3</sup> или 50,106 МДж/кг).

Материальный баланс реакций окислительно-восстановительных процессов определяется стехиометрическим (теоретическим) уравнением [7, 8]:

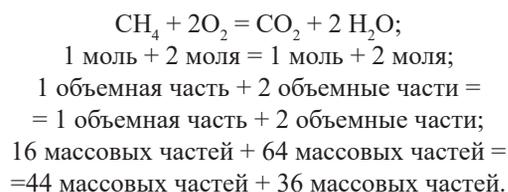


Таблица 2

## Молекулярная масса и плотность газов

Газ	Молекулярная масса, а.е.м.	Плотность $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>
Кислород $\text{O}_2$	32,00	1,429
Азот воздуха $\text{N}_2$	28,01	1,257
Воздух	28,96	1,293
Диоксид углерода $\text{CO}_2$	44,01	1,977
Оксид углерода $\text{CO}$	28,01	1,250
Водород $\text{H}_2$	2,02	0,090
Водяной пар $\text{H}_2\text{O}$	18,02	0,805
Метан $\text{CH}_4$	16,04	0,716
Этан $\text{C}_2\text{H}_6$	30,07	1,342

Последние две строчки можно написать в виде:

$$\begin{aligned} 1 \text{ м}^3 + 2 \text{ м}^3 &= 1 \text{ м}^3 + 2 \text{ м}^3; \\ 1 \text{ кг} + 4 \text{ кг} &= 2,75 \text{ кг} + 2,25 \text{ кг}. \end{aligned}$$

Это значит, что в результате реакции 1 м<sup>3</sup> метана с 2 м<sup>3</sup> кислорода на выходе ЭУ/ТЭ будет 1 м<sup>3</sup> двуоксида углерода и 2 м<sup>3</sup> паров воды, или в результате реакции 1 кг  $\text{CH}_4$  с 4 кг  $\text{O}_2$  — 2,75 кг  $\text{CO}_2$  и 2,25 кг  $\text{H}_2\text{O}$  (в виде пара или жидкости). Поскольку в качестве окислителя используется не чистый кислород, а воздух с содержанием в нём по объёму 21% кислорода, то следует определить количество воздуха, необходимого для нормального протекания указанного стехиометрического процесса:

$$V_B = V_{\text{O}_2} / 0,21,$$

где  $V_B$ ,  $V_{\text{O}_2}$  — объёмы воздуха и кислорода.

Для требуемой реакции на 1 м<sup>3</sup>  $\text{CH}_4$  нужно 2 м<sup>3</sup>  $\text{O}_2$ , поэтому требуемый объём воздуха равен:

$$V_B = 2 / 0,21 = 9,524 \text{ м}^3.$$

При этом не участвующая в реакции часть воздуха (в основном из азота  $\text{N}_2$ ) выглядит как

$$V_{\text{N}_2} = 0,79V_B = (9,524 - 2) \text{ м}^3 = 7,524 \text{ м}^3.$$

Таким образом, на 1 м<sup>3</sup>  $\text{CH}_4$  на входе ЭУ/ТЭ продукты реакции на выходе составляют объём

$$V_{\Sigma} = V_{\text{N}_2} + V_{\text{CO}_2} + V_{\text{H}_2\text{O}(\text{пар})} = 7,524 + 1 + 2 = 10,524 \text{ м}^3.$$

## Расчет потенциальной мощности топлива

Примем электрическую мощность ЭУ/ТЭ  $P_{ТЭ(эл)} = 15$  МВт = const и определим потенциальную мощность (секундную тепловую мощность) топлива (метана) на входе ЭУ/ТЭ:

$$Q_{ЭУ/ТЭ} = P_{ТЭ(эл)} / \eta_{ТЭ(эл)} = 15 / 0,5 = 30 \text{ МВт}.$$

Используемая полезная полная тепловая мощность топлива равна:

$$Q_{\text{полезн}\Sigma} = P_{\text{ТЭ(эл)}} / \eta_{\text{ТЭ(эл)}} = 15/0,7 = 21,43 \text{ МВт}$$

Необходимый объем газа (метана) в секунду по нижней теплоте сгорания  $Q_{\text{н}}$  составляет

$$V_{\text{r(CH}_4)} = \frac{Q_{\text{ЭУ/ТЭ}}}{Q_{\text{н}}} = \frac{30 \text{ МВт}}{35,93 \text{ МДж/(м}^3)} = \frac{30 \text{ МДж/с}}{35,93 \text{ МДж/(м}^3)} = 0,835 \text{ м}^3/\text{с}. \quad (1)$$

Тогда, с учетом данных табл. 2 и в соответствии с рассчитанным материальным балансом по стехиометрическому уравнению, запишем расход реагентов  $G$ :

$$V_{\text{r(CH}_4)}\rho_{\text{(CH}_4)} + 2V_{\text{r(CH}_4)}\rho_{\text{(O}_2)} = V_{\text{r(CH}_4)}\rho_{\text{(CO}_2)} + 2V_{\text{r(CH}_4)}\rho_{\text{(H}_2\text{O)}}.$$

После подстановки получим:

$$(0,835 \cdot 0,716)_{\text{CH}_4} + (2 \cdot 0,835 \cdot 1,429)_{\text{O}_2} = (0,835 \cdot 1,977)_{\text{CO}_2} + (2 \cdot 0,835 \cdot 0,805)_{\text{H}_2\text{O}}$$

или

$$(0,598 \text{ кг})_{\text{CH}_4} + (2,386 \text{ кг})_{\text{O}_2} = (1,651 \text{ кг})_{\text{CO}_2} + (1,344 \text{ кг})_{\text{H}_2\text{O}},$$

т.е. при полном окислении топлива при  $P_{\text{ТЭ(эл)}} = 15 \text{ МВт}$  и  $\eta_{\text{ТЭ(эл)}} = 0,5$  на выходе ЭУ/ТЭ образуется 1,344 кг/с = 4,84 т/ч воды и 1,651 кг/с = 5,944 т/ч углекислого газа.

Вес не прореагировавшей части воздуха (азота  $\text{N}_2$ ) равен

$$\begin{aligned} G_{\text{N}_2} &= G_{\text{B}} - G_{\text{O}_2} = \rho_{\text{B}} V_{\text{B}} - G_{\text{O}_2} = \\ &= \rho_{\text{B}} \frac{V_{\text{r(O}_2)}}{0,21} - G_{\text{O}_2} = \rho_{\text{B}} \frac{2V_{\text{r(CH}_4)}}{0,21} - G_{\text{O}_2} = \\ &= 1,293 \text{ кг/м}^3 \frac{2 \cdot 0,835 \text{ м}^3/\text{с}}{0,21} - 2,386 \text{ кг/с} = \\ &= 10,28 \text{ кг/с} = 37,017 \text{ т/ч}. \end{aligned}$$

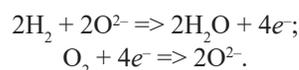
Исходя из общего КПД определим тепловую мощность, развиваемую на выходе ЭУ/ТЭ при  $\eta_{\text{ТЭ(эл)}} = 0,5$ :

$$\begin{aligned} Q_{\text{тепл(ТЭ)}} &= \frac{P_{\text{ТЭ(эл)}}}{\eta_{\text{ТЭ(эл)}}} (\eta_{\text{ТЭ(эл)}} - \eta_{\text{ТЭ(эл)}}) = \\ &= \frac{15 \text{ МВт}}{0,5} (0,7 - 0,5) = 6 \text{ МВт}. \end{aligned}$$

Эта тепловая мощность через сетевой подогреватель СП отводится от блока топливных элементов ЭУ/ТЭ для дальнейшего использования.

Принцип работы и химические реакции при прямой внутренней конверсии метана в топливном элементе типа SOFC при эксплуатации ЭУ/ТЭ в поселке с сетевым газоснабжением приведены на рис. 1.

На рисунке 2 представлен пример применения ЭУ/ТЭ совместно с ветроэнергетической установкой (ветроэнергетической станцией), системой электролиза и хранилищем водорода (для аккумулирования энергии). В этом случае ЭУ/ТЭ SOFC питается чистым водородом из электролизёра и хранилища при следующих химических реакциях на аноде и катоде:



Общая реакция элемента:



Такая вода может быть опять возвращена в электролизёр.

Во вторичный контур сетевого подогревателя СП по обратной магистрали (см. рис. 2) подается возвратная сетевая вода при  $t_{\text{ом}} = 70^\circ\text{C}$  из системы бытового теплоснабжения, а подача воды в сеть системы теплоснабжения из СП идет по прямой магистрали при  $t_{\text{пм}} = 120^\circ\text{C}$ . Расчетный расход сетевой воды  $G_{\text{св}}$  во вторичном контуре сетевого подогревателя СП, необходимый для отвода указанной тепловой мощности 6 МВт, составляет

$$\begin{aligned} G_{\text{св}} &= \frac{Q_{\text{тепл(ТЭ)}}}{C_{\text{в}}(t_{\text{пм}} - t_{\text{ом}})} = \frac{6000 \text{ кДж/с}}{4,19(120^\circ - 70^\circ)} = \\ &= 28,64 \text{ кг/с} = 103,1 \text{ т/ч}, \end{aligned}$$

где  $C_{\text{в}} = 4,19$  — теплоемкость воды.

#### Возможность аккумулирования водорода

Согласно уравнению (1) в секунду в ЭУ/ТЭ расходуется 0,835 м<sup>3</sup> метана (см. рис. 1), при этом содержание чистого водорода в метане — 25,03%. Очевидно, что для работы комплекса по схеме рис. 2 в течение часа при отмеченных нормальных условиях ЭУ/ТЭ потребуется израсходовать водорода в объёме  $(0,835 \cdot 0,2503 \cdot 3600) = 752,4 \text{ м}^3$ .

Накопитель водорода может быть в виде газгольдера или баллонного типа. Системы хранения газообразного водорода под давлением — одни из простых и не требуют специального оборудования для извлечения газа из хранилища. Алюминиевые баллоны современной конструкции, усиленные оболочкой углеволокна, относительно легкие, могут содержать газ при давлении 500 атм. объёмом 0,15 м<sup>3</sup> (150 л). Объём при нормальных условиях составляет  $0,15 \cdot 500 = 75 \text{ м}^3$  ( $0,090 \cdot 75 = 6,75 \text{ кг}$ ), что сравнимо с емкостью металлгидридных систем хранения водорода, теплотворная способность которого —  $141 \text{ МДж/кг} \cdot 6,75 \text{ кг} = 951,75 \text{ МДж}$ .

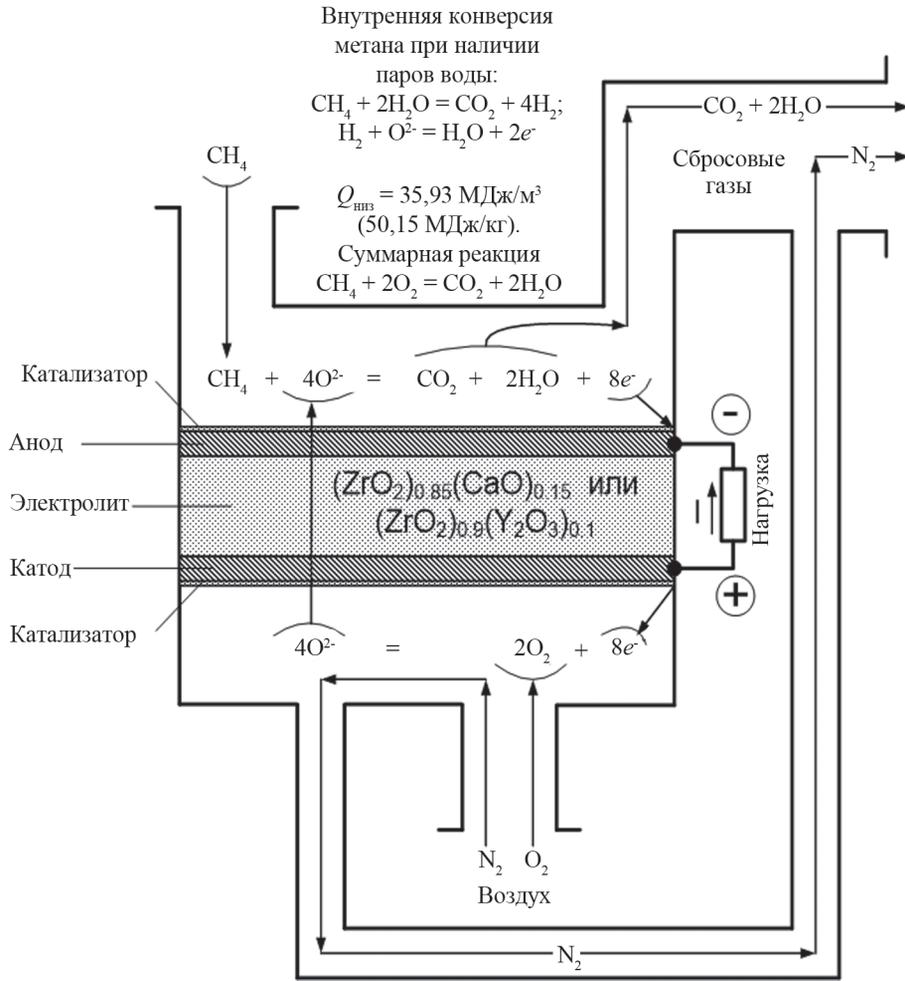


Рис. 1. Принцип работы топливного элемента типа SOFC

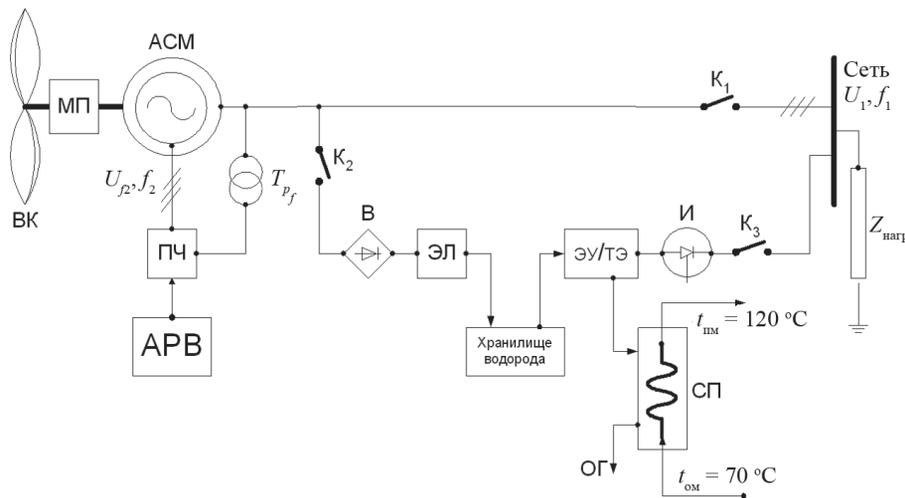


Рис. 2. Ветроэнергетическая установка с хранилищем водорода:

ВК — ветроколесо; МП — мультипликатор; АСМ — асинхронизированная синхронная машина; ПЧ — полупроводниковый преобразователь частоты; ТР — трансформатор; В — выпрямитель; Эл — электролизёр; ЭУ/ТЭ — энергоустановка на топливных элементах; И — инвертор; К — коммутаторы; З<sub>нагр</sub> — нагрузка электрическая; СП — сетевой подогреватель; ОГ — отработавшие газы

При полученных электрической и тепловой нагрузках в 15 и 6 МВт энергоёмкости одного баллона хватает на работу ЭУ/ТЭ с номинальным режимом в течение  $951,75 \text{ МДж}/21 \text{ МДж/с} = 45,32 \text{ с}$ . Очевидно, что при часовом безветрии для ЭУ/ТЭ с номинальной нагрузкой потребуется  $3600/45,32 = 79$  баллонов. Для небольшого посёлка при таком же соотношении электрической (1 МВт) и тепловой (0,4 МВт) нагрузок одного баллона хватает на 680 с, т. е. потребуется 5 баллонов на час работы ЭУ/ТЭ. В заключение отметим, что после электролизёра кислород можно также аккумулировать. При этом в соответствии с (2) потребуется в два раза меньше баллонов, чем для водорода.

### Литература

1. Попель О.С., Тарасенко А.Б., Филиппов С.П. Энергоустановки на основе топливных элементов: современное состояние и перспективы // Теплоэнергетика. 2018. № 12. С. 5—23.
2. Бредихин С.И. и др. Стационарные энергетические установки с топливными элементами: материалы, технологии, рынки. М: Изд-во НТФ «Энергопрогресс», 2017.
3. Коровин Н.В. Топливные элементы и электрохимические энергоустановки. М.: Изд-во МЭИ, 2005.
4. Батенин В.Г. Баранов Н.Н. Создание новых видов автономных энергоустановок на основе методов прямого преобразования энергии // Известия РАН. Серия «Энергетика». 1997. № 2. С. 3—27.
5. Das Erste Europäische 250-kW-PEM-Brennstoff-Zellenprojekt // Elektrizitätswirtschaft. 2000. V. 15. Pp. 58—62.
6. Smith D. Large Utilities Tom to Solid Oxide Systems. Dartford: Modern Power Systems. Germany Suppl., 2000. Pp. 27—30.
7. Полинг Л. Общая химия. М.: Мир, 1974.
8. Канарёв Ф.М. Начала физхимии микромира. Т. 1, 2. Краснодар: Изд-во Кубанского гос. аграрного ун-та, 2009.

### Сведения об авторе:

Цгоев Руслан Сергеевич — доктор технических наук, профессор кафедры гидроэнергетики и возобновляемых источников энергии НИУ «МЭИ», e-mail: TsgoyevRS@mpei.ru

### Information about author:

Tsgoev Ruslan S. — Dr.Sci. (Techn.), Professor of Hydro Power Engineering and Renewable Energy Sources Dept., NRU MPEI, e-mail: TsgoyevRS@mpei.ru

Статья поступила в редакцию: 23.11.2019

The article received to the editor: 23.11.2019

### Заключение

Предложена методика расчета режимов энергоустановки на топливных элементах в предположении, что входящие в состав топлива горючие элементы полностью окисляются, превращаясь в инертные газы. Определение расхода продуктов до и после реакций на входе и выходе ЭУ/ТЭ базируется на использовании метода материального баланса. Материальный и энергетический балансы топливных элементов рассчитаны на примере ЭУ/ТЭ типа SOFC с твёрдооксидным электролитом при прямой внутренней конверсии метана, а также при работе на чистом водороде в комплексе с ветроэнергетической установкой. Оценена возможность аккумулирования энергии в накопителях водорода.

### References

1. Popel' O.S., Tarasenko A.B., Filippov S.P. Energoustanovki na Osnove Toplivnykh Elementov: Sovremennoe Sostoyanie i perspektivy. Teploenergetika. 2018; 12:5—23. (in Russian).
2. Bredikhin S.I. i dr. Stacionarnye Energeticheskie Ustanovki s Toplivnymi Elementami: Materialy, Tekhnologii, Rynki. M: Izd-vo NTF «Energoprogress», 2017. (in Russian).
3. Korovin N.V. Toplivnye Elementy i Elektrokhimicheskie Energoustanovki. M.: Izd-vo MEI, 2005. (in Russian).
4. Batenin V.G. Baranov N.N. Sozdanie Novykh Vidov Avtonomnykh Energoustanovok na Osnove Metodov Pryamogo Preobrazovaniya Energii. Izvestiya RAN. Seriya «Energetika». 1997;2:3—27. (in Russian).
5. Das Erste Europäische 250-kW-PEM-Brennstoff-Zellenprojekt. Elektrizitätswirtschaft. 2000;15:58—62.
6. Smith D. Large Utilities Tom to Solid Oxide Systems. Dartford: Modern Power Systems. Germany Suppl., 2000:27—30.
7. Poling L. Obshchaya Khimiya. M.: Mir, 1974. (in Russian).
8. Kanarev F.M. Nachala Fizkhemii Mikromira. T. 1, 2. Krasnodar: Izd-vo Kubanskogo Gos. Agrarnogo Un-ta, 2009. (in Russian).