

DOI: 10.24937/2542-2324-2020-3-393-79-90  
УДК 629.5.03:621.352.6

**В.П. Ковалевский**

Филиал «ЦНИИ СЭТ» ФГУП «Крыловский государственный научный центр», Санкт-Петербург, Россия

## КОНЦЕПТУАЛЬНАЯ ПРОРАБОТКА ЭНЕРГОУСТАНОВКИ НА ОСНОВЕ ТВЕРДООКСИДНЫХ ТОПЛИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ МОЩНОСТЬЮ ДО 5000 Вт

**Объект и цель научной работы.** Целью работы является проработка принципиальной технологической схемы и основных конструктивных решений для создания экспериментального образца энергоустановки (ЭУ) на основе твердооксидных топливных элементов (ТОТЭ) ЦНИИ СЭТ мощностью до 5000 Вт на основе теплотехнического анализа отечественных и зарубежных образцов ЭУ ТОТЭ.

**Материалы и методы.** На основе углубленного обзора и математического анализа передового отечественного и зарубежного опыта создания ЭУ ТОТЭ обоснован класс перспективных технологических схем и определены основные подходы в компоновочных и конструктивных решениях при разработке экспериментального образца ЭУ ТОТЭ ЦНИИ СЭТ мощностью до 5000 Вт.

**Основные результаты.** Проведен анализ теплотехнических процессов, конструктивных и технологических решений, реализованных в отечественных и зарубежных ЭУ ТОТЭ, проработана технологическая схема экспериментального образца ЭУ ТОТЭ ЦНИИ СЭТ мощностью до 5000 Вт.

**Заключение.** С помощью разработанных и верифицированных математических моделей выполнен анализ наиболее эффективной ЭУ ТОТЭ BlueGen фирмы Ceramic Fuel Cells Limited (CFCL) и обоснованы пути дальнейшего совершенствования перспективных семейств тепловых схем ЭУ на базе планарных ТОТЭ. Исследовано влияние прериформинга, анодной и катодной рециркуляции и вольт-амперных характеристик батареи как на термодинамическую эффективность, так и на массогабаритные характеристики. Отработаны алгоритмы регулирования установки, продемонстрирована эффективность наиболее сложных и длительных из них с рядом ограничений режимов ввода и вывода из действия. Изложены принятые обоснованные принципы создания ряда ЭУ ТОТЭ ЦНИИ СЭТ мощностью от 500 до 5000 Вт.

**Ключевые слова:** твердооксидные топливные элементы, батареи планарных твердооксидных топливных элементов, энергоустановки на основе твердооксидных топливных элементов, теплотехнический и математический анализ.

*Автор заявляет об отсутствии возможных конфликтов интересов.*

DOI: 10.24937/2542-2324-2020-3-393-79-90  
UDC 629.5.03:621.352.6

**V. Kovalevsky**

SET Branch of the Krylov State Research Centre, St. Petersburg, Russia

## CONCEPTUAL DEVELOPMENT OF SOFC-BASED POWER PLANT WITH UP TO 5000W CAPACITY

**Object and purpose of research.** The purpose of this work performed by SET Branch of KSRC was to develop the principal technological layout and main design solutions for a breadboard SOFC-based power plant with the capacity of up to 5000 W. This work relied on existing Russian and international experience in design of SOFC-based power plants.

**Materials and methods.** In-depth review and mathematical analysis of latest Russian and international experience in design of SOFC-based power plants enabled justification of a whole class of promising designs, as well as identification of main approaches to development of breadboard SOFC-based power plant (capacity up to 5000 W) suggested by KSRC SET Branch.

*Для цитирования:* **Ковалевский В.П.** Концептуальная проработка энергоустановки на основе твердооксидных топливных элементов мощностью до 5000 Вт. Труды Крыловского государственного научного центра. 2020; 3(393): 79–90.

*For citations:* **Kovalevsky V.** Conceptual development of SOFC-based power plant with up to 5000W capacity. Transactions of the Krylov State Research Centre. 2020; 3(393): 79–90 (in Russian).

**Main results.** The study analyses calorific processes and design and technological solutions implemented in Russian and foreign SOFC-based power plants. It also suggests a technological layout for a breadboard SOFC-based power plant (capacity up to 5000 W) developed by KSRC SET Branch.

**Conclusion.** The mathematical models developed and verified in this study enabled the analysis of the most efficient SOFC-based power plant design, *BlueGen* by Ceramic Fuel Cells Limited (CFCL), as well as identification of further ways to the improvement of promising calorific designs for the power plants based on planar SOFCs. This study also investigated the effect of pre-reforming, anode and cathode recirculation and volt-ampere properties of the fuel cell stack upon its weight, size and thermodynamic efficiency. Another result of this work was the development of control algorithms for suggested power plant, with efficiency demonstration of the longest and the most complex among them, involving a number of limitations for startup/shutdown conditions. Finally, the paper explains design principles of 500–5000 W SOFC-based power plant family suggested by KSRC SET Branch.

**Keywords:** solid-oxide fuel cells (SOFC), planar SOFC stacks, SOFC-based power plants, calorific and mathematical analysis.  
*Author declares lack of the possible conflicts of interests.*

## Введение

### Introduction

Работающие на природном газе энергетические установки на топливных элементах (ЭУ ТЭ) рассматриваются в качестве одной из основных и многообещающих альтернатив освоенным источникам электроэнергии, либо имеющим высокие выбросы CO<sub>2</sub> (как, например, при работе на угле), либо считающимися небезопасными (ядерная энергетика) или ненадежными вследствие возможных высоких колебаний суточной выработки мощности (ветровая и солнечная энергия) [1]. В любых установках наибольшей эффективности удастся добиться при комбинированной выработке тепла и электричества, предполагающей наличие большого и постоянного спроса на тепло. При отсутствии постоянного (не сезонного) спроса в тепле наиболее перспективными становятся работающие на природном газе установки с высоким электрическим КПД. Наиболее эффективными из них являются энергоустановки на основе твердооксидных топливных элементов (ЭУ ТОТЭ), которые даже при малых, киловаттных мощностях имеют высокий электрический КПД (достигнутый уровень – 60 % двухкиловаттной установки [2]), свойственный в настоящее время лишь очень мощным (в сотни мегаватт) парогазовым блокам с высокотемпературными газотурбинными установками (ГТУ) [3, 4]. При наличии спроса на тепло и при конденсации паров воды из уходящих газов ЭУ ТОТЭ в составе когенерационных установок (КТЭУ) достигают значений общей термической эффективности (коэффициента использования топлива (КИТ)) до 95 %, что свойственно лишь очень мощным ТЭЦ, работающим с полными теплофикационными отборами и включенными теплофикационными пучками конденсатора [5, 6].

Исследованиями ТОТЭ и разработками ЭУ на их основе занимаются практически все фирмы и иссле-

довательские институты ведущих стран мира, лидирующие в мировой энергетике [7]. К настоящему времени достигнуто понимание проблем, уточнены методики расчетов, разработан набор материалов, позволяющих достигать приемлемого ресурса за счет снижения рабочей температуры. Это приводит к упрощению конструкции не только модулей ТОТЭ, но и ЭУ в целом при довольно простых схемных решениях. Исследовательский интерес смещается уже в сторону повышения активных площадей элементов ТОТЭ, увеличения их удельных мощностей и, что особенно важно, увеличения их ресурса.

В настоящей работе освещаются теплотехнические аспекты, схемные решения, технологическое обеспечение зарубежных ЭУ ТОТЭ применительно к разработке отечественного экспериментального образца энергоустановки мощностью до 5000 Вт с использованием паровой конверсии топлива и планарных ТОТЭ с несущим электролитом.

## Типы батарей на основе твердооксидных топливных элементов

### Types of SOFC stacks

В табл. 1 представлены различные типы батарей ТОТЭ ведущих фирм и приведены их качественные оценки по длительности срока службы и перспектив снижения стоимости при массовом производстве [1]. Видно, что выбранный для проработки тип планарных элементов с несущим электролитом по упомянутым параметрам рассматривается как наиболее перспективный.

На сегодняшний день технологии ТОТЭ демонстрируют рабочий ресурс батареи до 20 000 ч. и более при скорости деградации ее основных параметров менее чем 0,5 % на 1000 ч. работы в составе ЭУ [1]. Другими важными для батарей ТОТЭ техническими параметрами, кроме срока службы

**Таблица 1.** Наиболее распространенные конструктивные решения батарей на основе твердооксидных топливных элементов иностранных фирм

**Table 1.** The most popular foreign designs of SOFC stacks

Тип элемента	Планарный			Трубчатый	Сегментный
	Несущий элемент	Электролит	Анод		
Несущий элемент	–	–	–	–	Пористая керамика
Производители	Hexis, Bloom Energy, Sunfire (Staxera)	Versa Power, CFCL, Topsoe Fuel Cells, Delphi, SOFCPower, NGK Spark Plug	Ceres Power	Acumen-trics/Ariston, Mitsubishi Heavy Industries, Toto	Kyocera, Rolls-Royce
Рабочая температура, °C	800–900	700–800	600–700	800–900	750–900
Срок службы	Высокий	Средний	–	Высокий	Средний
Технология риформинга	ЧПО+ПР	ПР	ПР	ПР, ЧПО	ПР
Перспективная стоимость	Низкая	Средняя	Низкая	Высокая	Средняя

*Примечание:* ЧПО – частичное парциальное окисление; ПР – паровой риформинг.

и деградации, являются эффективность, потери давления, степень утилизации топливного газа, продолжительность времени разогрева и возможность интеграции в цикле. По этим показателям выбранное направление также является перспективным, уступая по эффективности лишь получающим в последнее время распространение конструкциям ТОТЭ с несущим анодом.

По типу планарных ТОТЭ (прямоугольные, с несущим электролитом и рабочей температурой около 850 °C) наиболее близким аналогом для экспериментального образца ЭУ ЦНИИ СЭТ мощностью до 5000 Вт является батарея Mk200 фирмы Sunfire (Staxera), интегрируемая в сборке с изоляцией в горячую зону.

## Технологические схемы энергоустановки на основе твердооксидных топливных элементов

Flow charts of a SOFC-based power plant

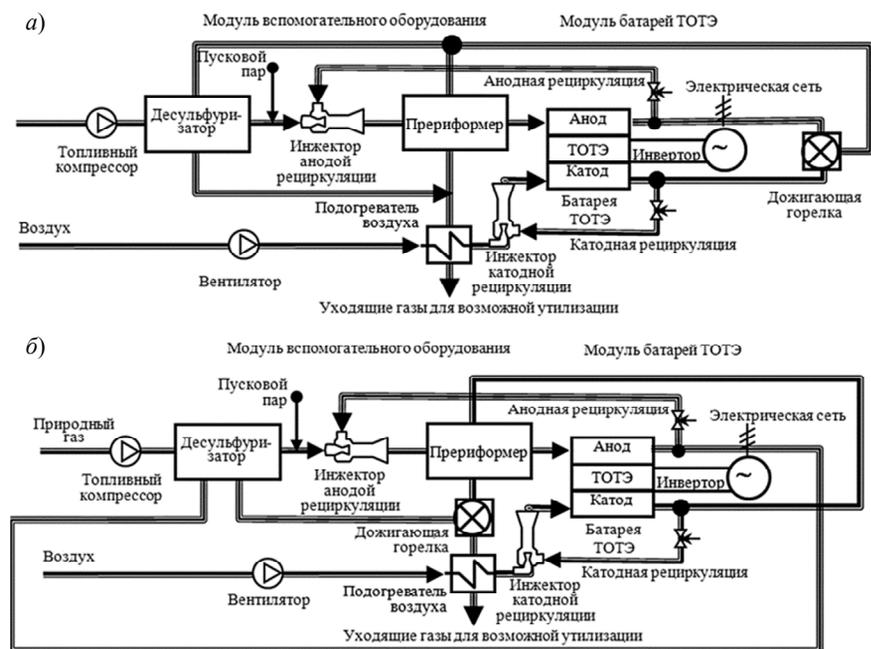
Для ЭУ ТОТЭ четко прослеживаются тенденции повышения удельных и абсолютных мощностей единичных ТОТЭ (батарей) за счет использования тонких электродных и электролитных слоев ТОТЭ, преимущественно с несущим анодом, при переходе на планарные или плоскотрубчатые конструкции ТОТЭ типа Siemens и двусторонние симметричные плоскотрубчатые конструкции с пористой подложкой анода типа LG Fuel Cell Systems или Kyocera Corporation. ЭУ на базе ТОТЭ даже в простом цикле могут функционировать только в довольно узком диапазоне ограничений рабочих характеристик – температуры

ТЭ, давления, соотношения водяного пара к углероду, коэффициента утилизации топлива и др.

Анализ данных ЭУ ТОТЭ свидетельствует о том, что рациональное построение термодинамически эффективных тепловых схем ЭУ ТОТЭ (даже таких простых, как рассмотренные в настоящей работе некогенерационные и негибридные) является сложной многопараметрической задачей, зависящей от вида топлива, вольт-амперных характеристик (ВАХ) ТОТЭ, соотношения тепловой и электрической нагрузок потребителя, циклограммы работы. Определяющие параметры ЭУ ТОТЭ могут находиться в стороне от таковых для термодинамического оптимума каждого основного элемента схемы по-отдельности при минимизации стоимости и сроков окупаемости. Все многообразие перспективных некогенерационных схем практически укладывается в две схемы, представленные на рис. 1а и 1б, различающихся расположением дожигающей горелки после ТОТЭ (1а) и перед подогревателем воздуха (регенератором) (1б). В конкретных схемах могут отсутствовать контуры катодной и/или анодной рециркуляции. В последнем случае, при паровом прериформинге, в усложненную схему включается парогенератор и оборудование водо-подготовки.

В табл. 2 приведены данные в порядке возрастания мощности по некоторым описанным в [6] ЭУ ТОТЭ, близким по мощности и используемому топливу к экспериментальному образцу ЭУ ЦНИИ СЭТ типоряда мощности 500–5000 Вт.

ЭУ предназначены для генерации переменного тока напряжением 220–230 В или постоянного тока напряжением 12 и 24 В. Многие из них являются



**Рис. 1.** Обобщенные технологические схемы с преформером, прямым внутренним риформингом и рециркуляционными контурами анодных и катодных газов и дожигающей горелкой сразу после твердооксидных топливных элементов (а) и перед подогревателем воздуха (регенератором) (б)

**Fig. 1.** Generalized flow charts with pre-reformer, direct internal reforming and recirculation circuits of anode and cathode gases and afterburner a) immediately behind solid-oxide fuel cells and b) in front of air warmer (regenerator)

когенерационными микроТЭЦ и оснащены баками-аккумуляторами воды, а некоторые – дополнительными горелками. Иногда с целью повышения коэффициента использования топлива (КИТ) и снижения генерации стороннего пара в когенерационном цикле идут на глубокое охлаждение уходящих газов с частичной конденсацией паров воды, возвращаемой в цикл (рис. 2).

Близкими к разрабатываемой по мощности, но базирующимися на более дорогих и эффективных планарных ТОТЭ с несущим анодом, являются установки фирм Ceramic Fuel Cells Limited (CFCL) [8–12] и SOFCpower (CFCP). Остановимся на первой из них как наиболее эффективной.

На рис. 2 показана мнемосхема работающей (контролируемой по интернету) установки BlueGen (CFCL) с высвечивающимися значениями параметров. Это простейшая схема, без рециркуляции, с дожигом за ТОТЭ (рис. 1а). Представленная установка мощностью 2000 Вт вместе с системой утилизации имеет размеры 660×600×1000 мм (объем 0,396 м<sup>3</sup> = 396 л). Ее объемная мощность по переменному току составляет 5 Вт/л. Заметим, что по этому показателю установка BlueGen не уступает наиболее напряженным и менее эффективным установкам фирмы Bloom Energy [13] в 125 раз большей мощности (250 кВт). Установка имеет непревзойденную, начиная с 2009 г. и до настоящего момента, электрическую эффективность (60 %) и может служить ориентиром при проектировании перспективных техно-

логических схем. В диапазоне нагрузок ЭУ ТОТЭ от 25 до 100 % электрический КПД имеет величину от 40 до 60 % при общем КИТ в когенерационном цикле не менее 85 %. Помимо использования ТЭ с несущим анодом, такие высокие показатели достигаются, прежде всего, за счет:

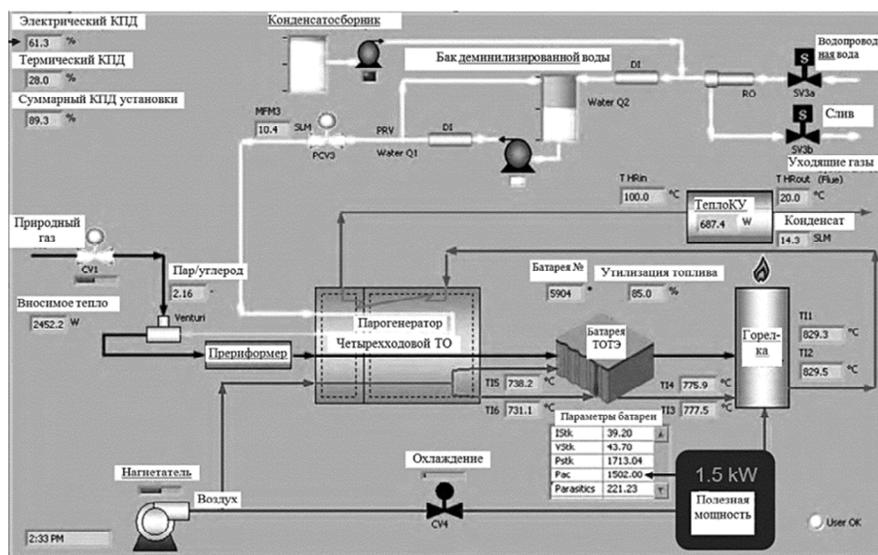
- использования лишь одной батареи мощностью 2300 Вт постоянного тока, весом 25 кг, с размерами 200×160×210 мм из 51 слоя повторяющихся элементов (объемная мощность батареи по постоянному току составляет 342 Вт/л, батарея работает в диапазоне температур 700–800 °С, имеет степень утилизации топлива 85 %, КПД батареи по постоянному току достигает 68 %, высокий внутренний риформинг позволяет работать при небольших избытках катодного воздуха);
- модульной компоновки батареи со всей своей жизнеобеспечивающей системой наиболее важного вспомогательного оборудования в модуль Genpex, размещенный в высокоэффективной, высокотемпературной изоляции. Модуль Genpex имеет рациональную и очень плотную компоновку с низкими тепловыми потерями, низкие сопротивления блочных трактов определяют небольшие затраты мощности на собственные нужды;
- расположенного за устройством дожига компактного блока теплообменных аппаратов, состоящего из высокоэффективного и компактного четырехходового теплообменника-

**Таблица 2.** Данные по параметрам энергоустановок на основе твердооксидных топливных элементов, производимых ведущими фирмами, с близкой к разрабатываемому типу ряду мощностью

**Table 2.** SOFC-based solutions of global market leaders with the capacity similar to KSRС SET products

Фирма	MD	Кусосета	Toho Gas	Hexis	ИВТЭ	CFCL	Sunfire (Staxera)	CFSP	РФЯЦ	Delphi	Asumen- trics
Тип ТОТЭ / несущий элемент	Т/Э	ПТ/ПКП	ПлД/А	ПлД/Э	Т/Э	ПлП/А	ПлП/Э	ПлП/А	Т/Э	ПлП/А	Т/А
Мощность, кВт	0,25	0,7	1	1	1,5	1,5	1,9	2,5	2,5	4,0	5
КПД по постоянному току, %	28-30	-	-	50	35	-	50	-	-	38	-
КПД по переменному току, %	-	46,5	55	30	-	60	30	50,1	-	-	50
КИТ, %	-	90	75	90	90	85	85	90	-	-	80
Рабочая температура, °С	800	740	700-800	900	900	750	856	650-800	900	-	-
Утилизация топлива/воздуха, %	75/-	-/-	-/-	85/18	-/-	85/-	74-80/18	-/-	85/-	-/-	75/-
Время пуска, мин.	15	130	-	120	120	25×60	120	-	-	200	45
Температура за ЭХГ, °С	-	200-300	-	-	-	100	124	-	-	-	-
Окружающая температура, °С	-	-5...40	-	-	-	-20...45	-	-	-	-	-30...50
Напряжение, В	12	100-200	-	230	24(220)	230	40,4	-	-	-	-
Топливо	К, П	Б, П, ПГ	ПГ	ПГ	-	ПГ	БГ, ПГ	БГ, ПГ	-	БЗ, ДТ	ПГ, БГ
Десульфуризатор, мес. работы	Есть, 12	Есть, 12	Есть, 12	Есть, 12	-	Есть, 12	-	-	-	-	-
Риформер	Возд.	Встроен	Паровой	Паровой	-	Паровой	Паровой	-	-	АР+возд.	Внутрен.
Пар/углерод (для паровых)	-	-	2,5	2,7	-	2	2,7	-	-	-	-
Когенерация	-	Да	Да	Да	-	Да	-	-	-	-	-
Тепловая мощность, кВт	-	-	-	<20(дож)	3,5	0,54	-	-	-	-	24 с дож
Вес, кг	4	92	91,5	170	170	200	-	-	-	85	-
Габарит ЭУ Ш×Г(Д)×В, мм	150×200× 270	563×302× 900	540×350× 950	550×550× 1600	1700×1300× 1100	600×660× 1200	-	600×800× 1600	-	400×660× 250	-
Эксплуатация, лет	-	10	-	10	5	15	5	-	-	-	-
Год выпуска	2006	2011	2005	-	2013	2010	2011	2014	-	2007	2002
Цена, долл.	-	17 000	-	-	>6000	8000	-	15 000	-	-	-
Число поставок, шт.	-	>700	>70	-	-	>1000	-	-	-	-	-

*Примечания:* 1. Сокращения названий фирм: MD – Mesoscopic Devices; Кусосета + Osaka Gas, Aisin Seiki, Chofu Seisakusho и Toyota; CFCL – Ceramic Fuel Cells Limited; CFSP – SOFCrower; ИВТЭ – АИТЭ-ТОТЭ-ЭХГ-1500 – совместная разработка ИВТЭ, завода электрохимических преобразователей, ЗАО «Уралингтех», ООО «Экоальянс» (АИТЭ-ТОТЭ-ЭХГ-1500 в блоке-боксе); РФЯЦ – РФЯЦ – ВНИИТФ. 2. Сокращения типов конструкций: ПлД – планарный дисковый; ПлП – планарный прямоугольный; ПП – плоскострубчатый; Т – трубчатый. 3. Сокращения несущих элементов: А – анод (АР – анодная рециркуляция); К – катод; ПКП – пористая керамическая подложка; Э – электролит. 4. Сокращения типа топлива: Б – бутан; БГ – биогаз; БЗ – биогаз; ДТ – дизельное топливо; К – керосин; П – пропан; ПГ – природный газ; дож – дожигание. 5. Цены (кроме Кусосета) приведены в предположении выпуска крупных партий (например, для CFSP – при заказе более 10 000 ЭУ).



**Рис. 2.** Адаптированная мнемосхема работающей установки BlueGen фирмы Ceramic Fuel Cells Limited (CFCL) со значениями текущих параметров

**Fig. 2.** Adapted mnemonic circuit of operating Ceramic Fuel Cells Limited (CFCL) BlueGen power plant with current parameters

воздухоподогревателя, подогревателя топлива и парогенератора;

- парового прериформера, преобразующего высшие углеводороды при температуре всего 500 °С с соотношением пар/углерод около 2,16 и низкой (всего на 10 %) конвертацией;
- блочной пусковой горелки – устройства дожига с низкой концентрацией горючих газов и большой концентрацией двуокиси углерода и паров воды;
- практически полного риформинга метана в батарее – непрореагировавшая часть не превышает 0,5 %;
- минимизации тепловых потерь (их удалось снизить до 200 Вт) за счет малого отношения поверхности к объему, свойственного плотной компоновке, использования микропористой вакуумной изоляции с коэффициентом теплопроводности 0,03 Вт/(м К) при температуре 800 °С и предельного сокращения являющихся теплопроводами выводов (токовых коллекторов, термопар, поддерживающих элементов и т.д.) через изоляцию;
- конструкции простого и высокоэффективного инвертора с потреблением менее 130 Вт (КПД около 92 %).

Перечислим приведенные на схеме рис. 2 или поддающиеся пересчету наиболее важные определяющие параметры для конструирования схемы. Подогрев воздуха в теплообменнике производится в среднем до 734,5 °С, в катодном пространстве – до 776,5 °С (по осредненным показаниям двух термопар). Приращение температуры воздуха в катодном пространстве составляет всего 42 °С, и это при

распараллеливании потоков и небольших размерах элемента (69,6×69,6 мм с толщиной приблизительно около 350 мкм).

Мощность брутто по постоянному току представленного режима составляет 1713 Вт, мощность нетто переменного тока – 1500 Вт. Следовательно, мощность собственных нужд (СН) и инвертора 213 Вт очень мала, около 10 %. На привод вентилятора (как основного потребителя СН) приходится 93 Вт. Возможно, что вентилятор питается постоянным током. При найденном расходе воздуха, аэродинамических сопротивлениях воздушно-газового тракта 1000 Па и КПД нагнетателя 45 % мощность сжатия не превышает 9 Вт. С учетом оценочных КПД электродвигателя (75 %), муфты сцепления (95 %) и подшипников (98 %) потребляемая мощность составит около 13 Вт. Оценивая мощность топливного компрессора и насоса в 5 Вт, предполагаем, что мощность остальных (постоянных) собственных нужд равна около 75 Вт. Эти данные являются хорошими начальными ориентирами при проектировании схем ЭУ ТОТЭ ЦНИИ СЭТ.

На основании данных схемы, представленной на рис. 2, была разработана обобщенная математическая модель (ММ), описывающая безрециркуляционную тепловую схему, которая близка к представленной на рис. 1а, и позволяющая рассчитывать распределения расходов, давлений, температур, компонентного состава потоков по анодному и катодному трактам установки BlueGEN. Данные расчетов по ММ подтверждают заявленные фирмой и представленные на рис. 2 параметры – значения параметров практически полностью совпадают с приведенными на мнемосхе-

ме (рис. 2) и диаграммой балансов (рис. 3) [2, 5]. Данные выполненных расчетов свидетельствуют о том, что степень конверсии топлива в преиформере является наиболее сильным средством влияния на эффективность (КПД и КИТ): необходимо поддерживать ее минимально возможное значение.

В табл. 3 и на рис. 3 представлены данные расчетов более сложных по сравнению с BlueGEN схем (рис. 1а), которые получены в предположении, что ВАХ и рабочая точка на ней остается неизменной и равной таковой как для BlueGEN, а также что при катодной рециркуляции увеличе-

ние потерь давления на рабочем сопле инжектора рециркуляции нивелируется снижением потерь давлений по остальным частям катодного и общего трактов.

Вариант 1 в табл. 3 – это рассмотренный выше режим установки BlueGEN фирмы CFCL, не имеющей рециркуляции. Варианты 2 и 3 различаются наличием катодной рециркуляции с коэффициентами инжекции [14] 1 и 4 соответственно. Вариант 4 отличается от варианта 1 наличием анодной рециркуляции, обеспечивающей заданное соотношение «пар/углерод». Вариант 5 отличается наличием ин-

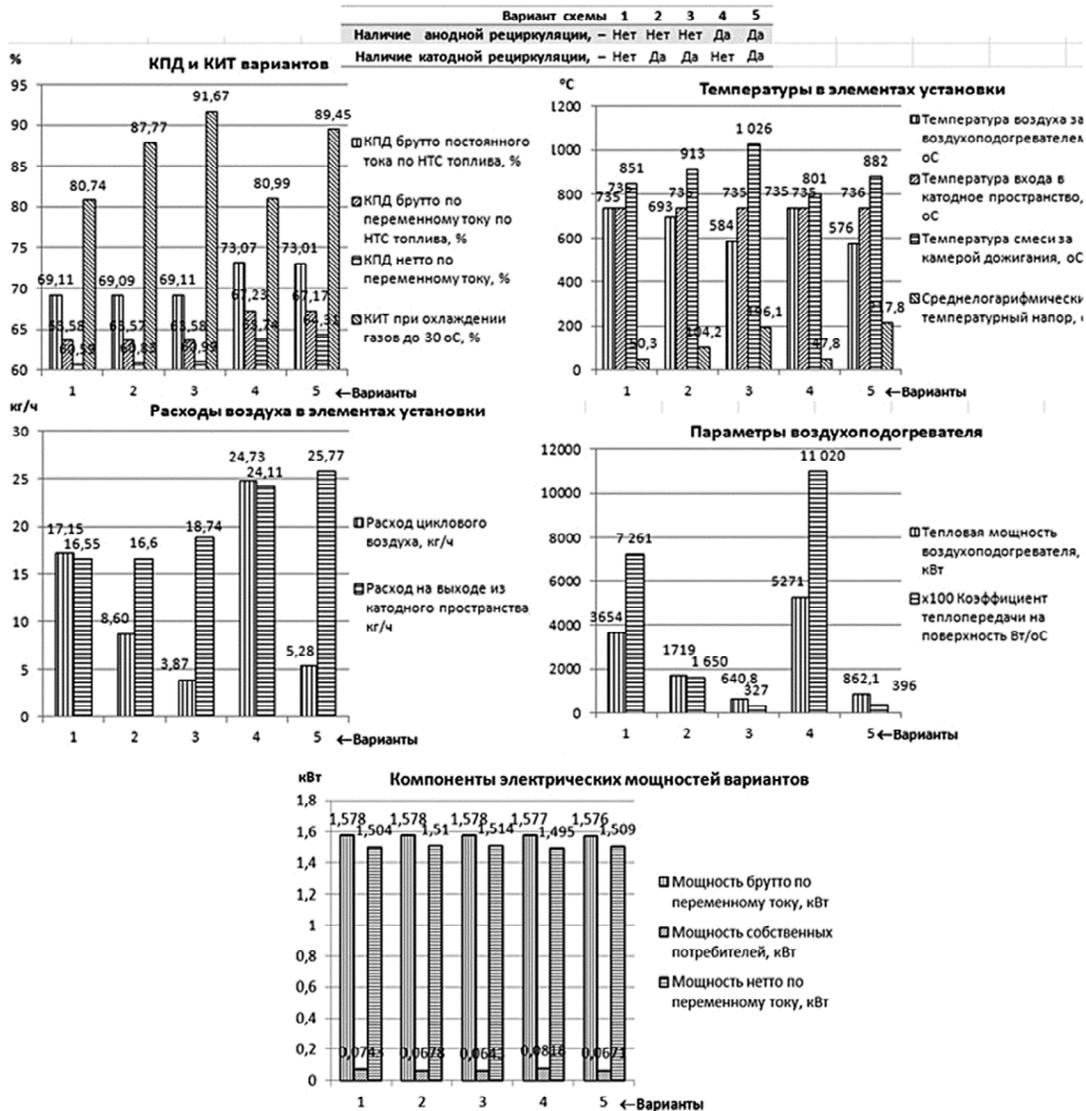


Рис. 3. Диаграммы соотношений параметров различных вариантов схем энергоустановки, представленных в табл. 3

Fig. 3. Comparative diagrams of different power plant designs (see Table 3)

жекторной катодной (с коэффициентами инъекции 4) и анодной рециркуляций одновременно.

Из рассмотрения представленных в табл. 3 материалов можно сделать следующие выводы:

1. Катодная рециркуляция (варианты 2 и 3) не только способствует увеличению КПД, но и существенно увеличивает КИТ. Тепловая мощность и поверхность воздухоподогревателя (следовательно, и тепловые потери) сокращается в разы, и ввиду существенного снижения темпера-

туры воздуха на выходе появляется возможность изготовления его из более дешевых материалов.

2. Анодная рециркуляция (вариант 4) не только упрощает схему (исключая имеющиеся в схеме на рис. 2 парогенератор, насос и систему водоподготовки), но и способствует существенному увеличению КПД при снижении максимальной температуры цикла.

3. При комбинации рециркуляций их отмеченные выше положительные свойства суммируются.

**Таблица 3.** Параметры цикла энергоустановки на основе твердооксидных топливных элементов мощностью около 2000 Вт постоянного тока при электрическом КПД твердооксидных топливных элементов 85,7 %, рабочей температуре 776,5 °С, 10%-ой конверсии (с соотношением «пар – углерод» 2,16 при температуре 700 °С), температуре наружного воздуха 25 °С и различных типах рециркуляции (при их наличии в схеме)

**Table 3.** Cycle parameters of a ~2000 W DC SOFC-based power plant with electric efficiency of solid-oxide fuel cells 85.7 %, operational temperature 776.5 °C, 10 % conversion (steam-carbon ratio 2.16 at 700 °C), ambient air temperature 25 °C and various types of recirculation (if any)

Вариант схемы	1	2	3	4	5
Наличие анодной рециркуляции, –	Нет	Нет	Нет	Да	Да
Наличие катодной рециркуляции, –	Нет	Да	Да	Нет	Да
Коэффициент инъекции катодной циркуляции, –	–	1	4	–	4
Подогрев воздуха в катодном пространстве, °С	43	42,8	43	43	45
Расход топлива, кг/ч	0,1786	0,1786	0,1786	0,1687	0,1685
Тепловая мощность топлива по НТС, кВт	2,482	2,482	2,482	2,345	2,347
КПД брутто постоянного тока по НТС топлива, %	69,11	69,09	69,11	73,07	73,01
Мощность брутто по переменному току, кВт	1,578	1,578	1,578	1,577	1,576
КПД брутто по переменному току по НТС топлива, %	63,58	63,57	63,58	67,23	67,17
Мощность собственных потребителей, кВт	0,0743	0,0678	0,0643	0,0818	0,0671
Мощность нетто по переменному току, кВт	1,504	1,510	1,514	1,495	1,509
КПД нетто по переменному току, %	60,59	60,83	60,99	63,74	64,31
КИТ при охлаждении газов до 30 °С, %	80,74	87,77	91,67	80,99	89,45
Тепловая мощность утилизации тепла, кВт	0,500	0,669	0,7614	0,405	0,5901
Расход циклового воздуха, кг/ч	17,15	8,603	3,870	24,73	5,277
Температура воздуха за воздухоподогревателем, °С	734,5	692,6	584,0	734,5	576,0
Температура входа в катодное пространство, °С	734,5	734,7	734,5	734,5	736,3
Температура смеси за камерой дожигания, °С	850,8	912,8	1026	801,3	881,5
Температура газов перед воздухоподогревателем, °С	786,8	793,4	789,7	772,6	759,1
Расход на выходе из катодного пространства, кг/ч	16,55	16,60	18,74	24,11	25,77
Отводимое тепло из батарей (общее), кВт	0,2725	0,2725	0,2725	0,3732	0,3734
Тепловая мощность воздухоподогревателя, Вт	3654	1719	640,8	5271	862,1
Среднелогарифмический температурный напор, °С	50,32	104,2	196,1	47,81	217,8
$k \cdot F = Q/\Delta t$	72,61	16,50	3,267	110,2	3,96

В табл. 4 и на рис. 4 представлены расчеты схемы установки BlueGEN (рис. 2) при различных гипотетических рабочих напряжениях ТЭ – от исходного 0,857 В, характерного для элементов с несущим анодом, до 0,7 В, наиболее характерного для элементов с несущим электролитом. Основным предположением была неизменность относительных потерь тепла и потерь давления. Подогрев воздуха в катодном пространстве также сохранялся постоянным. Из рассмотрения данных, представленных в табл. 4 и на рис. 4, можно сделать следующие основные выводы:

1. Снижение рабочего напряжения ТОТЭ приводит к существенному уменьшению электриче-

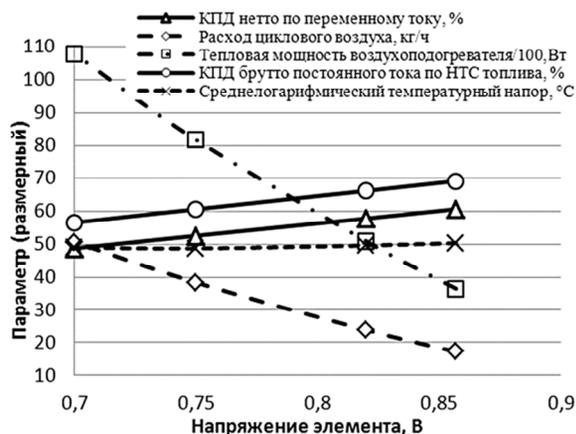
ского КПД и КИТ, резкому росту габаритов воздухоподогревателя. Это является платой за повышенную надежность и снижение затрат на изготовление ТЭ с несущим электролитом.

2. При переходе от ВАХ ТОТЭ с несущим анодом к применяемым нами ТОТЭ с несущим электролитом эффективная схема BlueGEN (CFCL) теряет около 12 % по КПД.
3. Чтобы быть теплотехнически схемно конкурентными, установки на ТОТЭ с несущим электролитом должны иметь электрический КПД по переменному току на уровне 48 %, а по постоянному току – выше на величину потерь инвертора.

**Таблица 4.** Параметры цикла схемы установки BlueGEN (CFCL) мощностью около 2000 Вт постоянного тока при изменении напряжения твердооксидных топливных элементов от 0,857 до 0,7 В, рабочей температуре 776,5 °С и конверсии с соотношением «пар – углерод» 2,16 при температуре 700 °С (без рециркуляции при температуре наружного воздуха 25 °С)

**Table 4.** Cycle parameters of ~2000 W DC BlueGEN (CFCL) power plant with SOFC voltage variation from 0.857 to 0.7 V, operational temperature 776.5 °C and conversion with steam-carbon ratio 2.16 at 700 °C (no recirculation, ambient air temperature 25 °C)

Вариант схемы	1	2	3	4
Напряжение элемента, В	0,857	0,820	0,750	0,70
Подогрев воздуха в катодном пространстве, °С	43	43	43	43
Расход топлива, кг/ч	0,1786	0,1863	0,2035	0,2179
Тепловая мощность топлива по НТС, кВт	2,482	2,590	2,831	3,029
КПД брутто постоянного тока по НТС топлива, %	69,11	66,14	60,59	56,55
Мощность брутто по переменному току, кВт	1,578	1,576	1,578	1,576
КПД брутто по переменному току по НТС топлива, %	63,58	60,85	55,75	52,03
Мощность собственных потребителей, кВт	0,0743	0,0794	0,0904	0,0997
Мощность нетто по переменному току, кВт	1,504	1,497	1,487	1,476
КПД нетто по переменному току, %	60,59	57,78	52,55	48,74
КИТ при охлаждении газов до 30 °С, %	80,74	76,69	71,46	71,85
Тепловая мощность утилизации тепла, кВт	0,500	0,490	0,535	0,700
Расход циклового воздуха, кг/ч	17,15	23,89	38,39	50,63
Температура воздуха за воздухоподогревателем, °С	734,5	734,5	734,5	734,5
Температура входа в катодное пространство, °С	734,5	734,5	734,5	734,5
Температура смеси за камерой дожигания, °С	850,8	833,5	816,2	809,1
Температура газов перед воздухоподогревателем, °С	786,8	785,1	783,7	782,9
Расход на выходе из катодного пространства, кг/ч	16,55	23,25	37,7	49,90
Отводимое тепло из батарей (общее), кВт	0,2725	0,3619	0,5561	0,7181
Тепловая мощность воздухоподогревателя, Вт	3654	5090	8180	10790
Среднелогарифмический температурный напор, °С	50,32	49,61	48,72	48,97
$k \cdot F = Q/\Delta t$	72,61	102,6	167,9	220



**Рис. 4.** Зависимость параметров схемы установки типа BlueGEN фирмы CFCL от расчетного напряжения используемого топливного элемента (от несущего электролита до несущего анода)

**Fig. 4.** Design parameters of CFCL BlueGEN power plant versus design fuel cell voltage (from bearing electrolyte to bearing anode)

Рабочая температура ТОТЭ с несущим анодом на 100 °С ниже, чем у ТОТЭ с несущим электролитом. Это снижает проблемы разработки, габаритов, тепловых потерь и времени пуска.

Итак, для разработки основных концептуальных положений схемы и конструкции ЭУ ТОТЭ ЦНИИ СЭТ необходимо сделать важные промежуточные выводы:

1. разработанные модели хорошо подтверждаются расчетами общепризнанных схем и проверенных данных многолетних замеров;
2. разработаны пути концептуального совершенствования эффективной схемы установки CFCL с достигнутым КПД 60 % по переменному току;
3. использование в эффективной схеме установки CFCL с ТОТЭ на несущем аноде на ТОТЭ с несущим электролитом снижает КПД установки по переменному току с 60 до 48 %;
4. чтобы быть конкурентной, установка на ТОТЭ с несущим электролитом должна иметь электрический КПД по переменному току на уровне 48 %, чего можно достичь только за счет усложнения технологической схемы и предельного сокращения тепловых потерь.

В соответствии с изложенными выше результатами для ряда ЭУ ТОТЭ ЦНИИ СЭТ мощностью от 500 до 5000 Вт принята схема, представленная на рис. 5, близкая к ранее рассмотренной на рис. 1б.

Высшая температура цикла этой схемы, при прочих равных условиях, приблизительно на 40 °С

ниже, чем у схемы, представленной на рис. 1а, – это значительная величина для принятой рабочей температуры. Более низкая температура схемы упрощает подбор материалов и конструктивные решения по прериформеру, дожигающей (пусковой) горелке и подогревателю топлива. Параметры же воздухоподогревателя идентичны для обоих вариантов.

В схеме в общем случае предусмотрены следующие основные регуляторы:

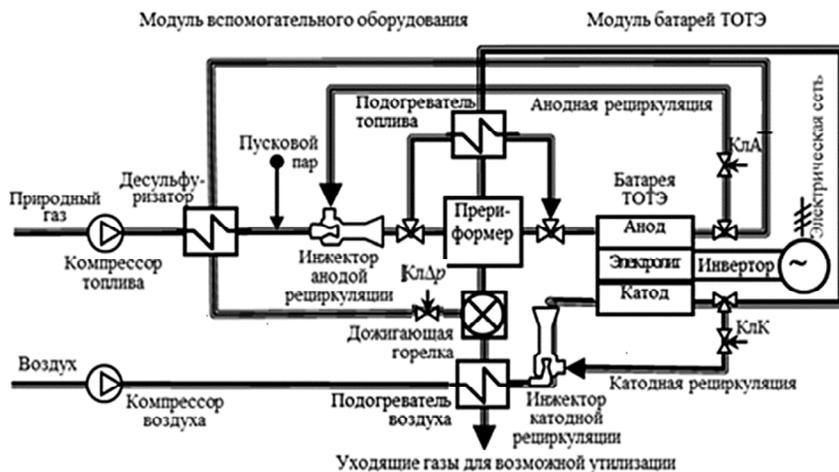
- электрической мощности, воздействующий на величину расхода топлива;
- рабочей температуры, воздействующий на величину расхода воздуха;
- температуры воздуха за воздухоподогревателем, воздействующий на байпасный клапан воздухоподогревателя (не показан);
- степени конверсии топлива, воздействующий на величину расхода топливной смеси через собственно прериформер;
- температуры топлива, воздействующий на величину расхода топливной смеси через подогреватель топлива за счет байпасного перепуска (не показан);
- нулевого перепада давления, воздействующий на величину давления анодного газа до камеры дожигания;
- растопочной горелки, воздействующий на величину расхода топлива в режимах ввода, вывода, «холостых» ходов и очень малых нагрузок.

Требуемые величины расходов анодной и катодной рециркуляции обеспечиваются соотношением диаметров основных конструктивных элементов соответствующих инжекторов [14] и дополнительно подстраиваются показанными на рис. 5 настроенными клапанами.

Непосредственное регулирование степени конверсии прериформера довольно затруднительно ввиду, например, изменения в процессе эксплуатации качества обеспечивающего конверсию катализатора. По этой причине регулирование степени конверсии обеспечивается за счет разделения потока на две части – меньшую, пропускаемую через прериформер, где обеспечивается степень конверсии, близкая к 100 %, и большую, идущую в обход прериформера с последующим смешением потоков. Порядок расположения подогревателя топлива и прериформера по ходу греющего воздуха может быть изменен. Подача на конверсию пара и углекислого газа, как уже говорилось, обеспечивается путем рециркуляции части анодного газа, в массовом составе которого содержится более 50 % водяного пара.

**Рис. 5.** Концептуальная технологическая схема с отдельными элементами регулирования и однотипно представленной гидравликой трубопроводов

**Fig. 5.** Conceptual flow chart with separate control elements and standard piping hydraulics



КЛА, КЛК - клапана подстройки анодной и катодной рециркуляции  
КЛ ДР - клапан поддержания нулевого перепада давления между анодным и катодным объемами

## Заключение

### Conclusion

Полученные результаты и достигнутые характеристики оборудования позволили корректно и аргументированно использовать их для идентификации разработанных моделей и пересчетов при разработке более сложных и эффективных установок, предложенных в рамках концепции разработки ЭУ ТОТЭ ЦНИИ СЭТ до 5000 кВт, являющейся конкурентоспособной по сравнению с ЭУ аналогичной мощности ведущих мировых производителей с ТОТЭ на несущем электролите.

Обоснованы общие принципиальные положения технологических путей достижения высоких КПД.

Рассмотрены и проанализированы основные общие конструктивные и схемные решения, способствующие увеличению электрической эффективности ЭУ.

Общая мировая тенденция конструирования перспективных планарных батарей состоит в использовании термодинамически более эффективных ТОТЭ с несущим анодом. Используемые в ЭУ ТОТЭ ЦНИИ СЭТ более дешевые и технологичные элементы с несущим электролитом существенно ограничивают эффективность установки в целом.

Для сокращения габаритов воздухоподогревателя, снижения его температуры по воздуху (переход на более дешевые материалы), отказа от парогенератора и увеличения КПД цикла целесообразна одновременная установка инжекторов катодной и анодной рециркуляции.

Для ЭУ всех мощностей и схем необходимо стремиться к поддержанию минимально допустимых сте-

пеней конверсии в прериформере, соотношения «пар – углерод» и максимально допустимых по условиям прочности элементов и батареи в целом приращений температуры в катодном объеме. Для управления степенью конверсии и сокращения аэродинамических сопротивлений анодного тракта при любом типе схем эффективно использование распараллеливания потоков прериформер – теплообменник.

Энергоустановка простой схемы должна допускать встраивание в когенерационные схемы с баком-аккумулятором, тригенерационные схемы и комбинированные схемы с двигателями Стирлинга и газопоршневыми агрегатами.

## Библиографический список

1. Status and market opportunities of solid oxide fuel cells based cogeneration systems / *Posdziech O., Mai B.E., Wunderlich C., Voss S.* // International Gas Union Research Conference (IGRC 2011), 19–21 October 2011, Seoul. Red Hook: Curran, 2012. Vol. 3. P. 2490–2506.
2. *Föger K., Rowe T.* Ceramic fuel cells Ltd residential generator bluegen ultra-efficient distributed power generation in smart grid environment // International Gas Union Research Conference (IGRC 2011), 19–21 October 2011, Seoul. Red Hook: Curran, 2012. Vol. 3. P. 2296–2307.
3. *Ковалевский В.П.* Термодинамическая эффективность циклов парогазовых установок: сравнительный анализ. Saarbrücken: Palmarium Academic Publishing, 2014. 658 с.
4. Топливные элементы – будущее тепловой энергетики / *Бредихин С.И.* [и др.] // Вести в электроэнергетику. 2016. № 1. С. 28–34.
5. *Föger K.* Ceramic Fuel Cells Ltd: Ultra-high-efficiency residential power system // Proceedings of 3<sup>rd</sup> European

- Fuel Cell Technology Applications Conference (EFC 2009). Rome: ENEA, 2009. P. EFC09-17023, p. 41.
6. Стационарные энергетические установки с топливными элементами: материалы, технологии, рынки / *Бредихин С.И.* [и др.]. Москва: Энергопрогресс, 2017. 390 с.
7. *McPhail S. J., Kiviaho J., Conti B.* The Yellow Pages of SOFC Technology. International Status of SOFC deployment 2017. Helsinki: Juvenes Print, 2017. 49 p.
8. *Kendall K., Kendall M.* High-temperature solid oxide fuel cells for the 21<sup>st</sup> century: fundamentals, design and applications. 2nd ed. London: Elsevier: Academic Press, 2016. XII, 508 p.
9. *Föger K.* Challenges in commercialising an ultraefficient SOFC residential generator [Electronic resource] // 4<sup>th</sup> IPHE Workshop on Stationary Fuel Cells (1 March, 2011, Tokyo). URL: [https://www.iphe.net/docs/Events/Japan\\_3-11/2-Foeger\\_CFD\\_IPHE.pdf](https://www.iphe.net/docs/Events/Japan_3-11/2-Foeger_CFD_IPHE.pdf).
10. Development of SOFC stacks at ceramic fuel cells limited / *Love J.* [et al.] // ECS Transactions. 2009. Vol. 25, № 2. P. 115–124. DOI: 10.1149/1.3205516.
11. *Payne R., Love J., Kah M.* CFCL's BlueGen Product // ECS Transactions. 2011. Vol. 35, № 1. P. 81–85. DOI:10.1149/1.3569981.
12. *Payne R., Love J., Kah M.* Generating electricity at 60% electrical efficiency from 1-2 kWe SOFC Products // ECS Transactions. 2009. Vol. 25, № 2. P. 231–239. DOI: 10.1149/1.3205530.
13. *Rouse M.* Bloom Energy Server (Bloom box) [Electronic resource] // TechTarget: [site]. Newton, 2013. URL: <http://searchdatacenter.techtarget.com/definition/Bloom-Energy-Server> (accessed: July 08.2020).
14. *Соколов Е.Я., Зингер Н.М.* Струйные аппараты. 3-е изд., перераб. Москва: Энергоатомиздат, 1989. 350, [1] с.
5. *K. Föger.* Ceramic Fuel Cells Ltd: Ultra-high-efficiency residential power system // Proceedings of 3<sup>rd</sup> European Fuel Cell Technology Applications Conference (EFC 2009). Rome: ENEA, 2009. P. EFC09-17023, p. 41.
6. *S. Bredikhin et al.* Stationary fuel cell-based power plants: materials, technologies, markets. Moscow: Energoprogress, 2017. 390 p. (in Russian).
7. *S.J. McPhail, J. Kiviaho, B. Conti.* The Yellow Pages of SOFC Technology. International Status of SOFC deployment 2017. Helsinki: Juvenes Print, 2017. 49 p.
8. *K. Kendall, M. Kendall.* High-temperature solid oxide fuel cells for the 21<sup>st</sup> century: fundamentals, design and applications. 2<sup>nd</sup> ed. London: Elsevier: Academic Press, 2016. XII, 508 p.
9. *K. Föger.* Challenges in commercialising an ultraefficient SOFC residential generator [Electronic resource] // 4<sup>th</sup> IPHE Workshop on Stationary Fuel Cells (1 March, 2011, Tokyo). URL: [https://www.iphe.net/docs/Events/Japan\\_3-11/2-Foeger\\_CFD\\_IPHE.pdf](https://www.iphe.net/docs/Events/Japan_3-11/2-Foeger_CFD_IPHE.pdf).
10. Development of SOFC stacks at ceramic fuel cells limited / *Love J.* [et al.] // ECS Transactions. 2009. Vol. 25, № 2. P. 115–124. DOI: 10.1149/1.3205516.
11. *R. Payne, J. Love, M. Kah.* CFCL's BlueGen Product // ECS Transactions. 2011. Vol. 35, № 1. P. 81–85. DOI:10.1149/1.3569981.
12. *R. Payne, J. Love, M. Kah.* Generating electricity at 60% electrical efficiency from 1-2 kWe SOFC Products // ECS Transactions. 2009. Vol. 25, № 2. P. 231–239. DOI: 10.1149/1.3205530.
13. *M. Rouse.* Bloom Energy Server (Bloom box) [Electronic resource] // TechTarget: [site]. Newton, 2013. URL: <http://searchdatacenter.techtarget.com/definition/Bloom-Energy-Server> (accessed: July 08.2020).
14. *Ye. Sokolov, N. Zinger.* Steam ejectors. 3<sup>rd</sup> edition (revised). Moscow: Energoatomizdat, 1989. 350 [1] p. (in Russian).

## References

1. Status and market opportunities of solid oxide fuel cells based cogeneration systems / *O. Posdziech, B.E. Mai, C. Wunderlich, S. Voss* // International Gas Union Research Conference (IGRC 2011), 19–21 October 2011, Seoul. Red Hook: Curran, 2012. Vol. 3. P. 2490–2506.
2. *K. Föger, T. Rowe.* Ceramic fuel cells Ltd residential generator bluegen ultra-efficient distributed power generation in smart grid environment // International Gas Union Research Conference (IGRC 2011), 19–21 October 2011, Seoul. Red Hook: Curran, 2012. Vol. 3. P. 2296–2307.
3. *V. Kovalevsky.* Thermodynamic cycle efficiency of combined-cycle gas turbines (CCGTs). Saarbrücken: Palmarium Academic Publishing, 2014. 658 p. (in Russian).
4. *S. Bredikhin et al.* Fuel cells: the future of thermal power engineering // Electric Power News. 2016. No. 1. P. 28–34 (in Russian).

## Сведения об авторе

Ковалевский Валерий Пименович, д.т.н., заместитель начальника отдела НИО-21 филиала «ЦНИИ СЭТ» ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196128, Россия, Санкт-Петербург, ул. Благодатная, д. 6.

## About the author

Valery P. Kovalevsky, Dr. Sci. (Eng.), Deputy Head of Department, TSNI SET branch of Krylov State Research Centre. Address: 6, Blagodatnaya st., St. Petersburg, Russia, post code 196128.

Поступила / Received: 08.07.20  
Принята в печать / Accepted: 21.08.20  
© Ковалевский В.П., 2020