

УДК 621.33

## РАСЧЕТНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ В ОБЕСПЕЧЕНИЕ ВЫБОРА ПРИНЦИПИАЛЬНОЙ СХЕМЫ И РАЦИОНАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ СТЕНДОВОГО ДЕМОНСТРАТОРА БОРТОВОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ НА ТВЕРДОПОЛИМЕРНОМ ТОПЛИВНОМ ЭЛЕМЕНТЕ

И. С. АВЕРЬКОВ<sup>1</sup>, А. В. БАЙКОВ<sup>2</sup>, В. С. ЗАХАРЧЕНКО<sup>3</sup>, О. Д. СЕЛИВАНОВ<sup>4</sup>

<sup>1</sup>averkov@ciam.ru, <sup>2</sup>baykov@ciam.ru, <sup>3</sup>zvs002@ciam.ru, <sup>4</sup>selivanov@ciam.ru

ФГУП «Центральный институт авиационного моторостроения имени П.И. Баранова» (ЦИАМ)

Поступила в редакцию 26.12.2017

**Аннотация.** Статья посвящена сравнительной оценке эффективности применения гибридной бортовой энергетической установки на основе твердополимерных топливных элементов в составе вспомогательной силовой установки летательного аппарата. При использовании водорода твердополимерные топливные элементы имеют КПД на уровне 50% и простую схему установки, что позволяет достичь высокой удельной мощности. Предварительные расчеты показали, что наибольший КПД из рассмотренных схем имеет кислородно-водородная энергетическая установка. Среди воздушно-водородных энергетических установок наибольший КПД имеет энергетическая установка с использованием электродвигателя в качестве привода компрессора.

**Ключевые слова:** вспомогательная силовая установка; твердополимерный топливный элемент; энергетическая установка; турбокомпрессор; эффективность.

### ВВЕДЕНИЕ

Твердополимерные топливные элементы (ТПТЭ) [1] являются одними из перспективных типов топливных элементов, способных генерировать достаточно высокие удельные мощности (от 0,5 кВт/кг до 0,8 кВт/кг, а в перспективе и до 1,5 кВт/кг). Рабочая температура ТПТЭ находится на уровне от +60 до +90°C, что позволяет им реализовать быстрый запуск. С другой стороны, низкая температура вынуждает использовать в составе конструкции топливных элементов дорогие катализаторы, в качестве которых широко используется платина. В качестве топлива в ТПТЭ используется водород, а окислителя – кислород атмосферного воздуха. Водород может храниться на борту в газообразном виде (в баллонах) или жидком. В последнем случае также требуется система газификации и нагрева газа. Также водород может быть получен из углеводородного топлива путем риформинга. Но в этом случае значительно усложняется конструкции из-за того, что в

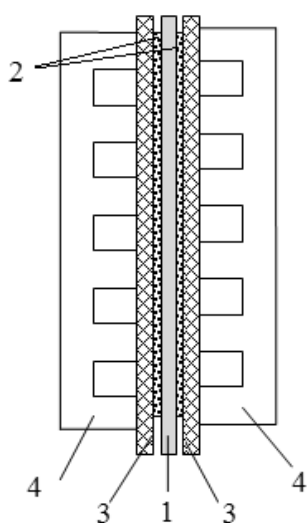
газе, поступающем на питание ТПТЭ, концентрация углекислого газа CO должна быть не более 10–50 ppm. Это связано с тем, что CO отравляет катализатор и ухудшает мощностные характеристики ТПТЭ.

Проводимость мембраны ТПТЭ очень зависит от ее насыщенности водой. Поэтому одной из проблем при работе с такими топливными элементами (ТЭ) является необходимость увлажнения воздуха, а иногда и подаваемого в ТПТЭ горючего. ТПТЭ, как правило, имеют планарную конструкцию, состоящую из отдельных ячеек. Необходимость увлажнения окислителя и горючего ограничивает возможность повышения рабочего давления в батарее ТПТЭ [2].

### ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

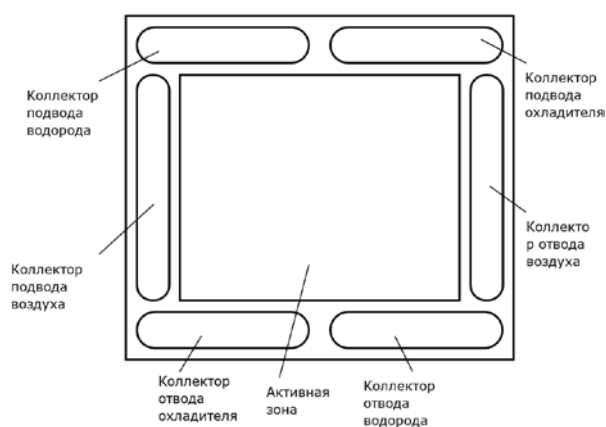
Одна ячейка ТПТЭ (рис. 1, 2) включает в себя мембранно-электродный блок (МЭБ) и интерконнекторы с каналами для реагентов. МЭБ включает в себя протонообменную мембрану с напыленным на нее каталитическим слоем и пористые слои, образующие

катод и анод. Для получения батареи нужной мощности отдельные ячейки собираются в единую стопку (блок) и стягиваются вместе шпильками (рис. 3).



**Рис. 1.** Схема ячейки ТПТЭ:

1 – протонообменная мембрана; 2 – каталитическое напыление; 3 – газодиффузионный слой; 4 – интерконнектор с каналами для реагентов



**Рис. 2.** Схема ячейки в плане

Для равномерного распределения рабочих сред между ячейками площадь коллекторных каналов должна заметно превосходить суммарную площадь каналов одной ячейки. В пределах одной ячейки количество параллельных каналов должно быть ограничено. Особенно это касается воздушных каналов. Для надежного вывода продуктов реакции (воды) из каналов при номинальном расходе воздуха количество каналов должно быть таким, чтобы скорость воздуха в каждом из каналов оставалась бо-

лее 6...7 м/с (с учетом давления в батарее). При этом каналы воздуха должны равномерно покрывать всю активную площадь мембраны.



**Рис. 3.** Батарея ТПТЭ фирмы Horizon

Можно отметить следующие особенности работы батареи ТПТЭ с электролитом типа Nafion (фирма Dupont de Numours) или МФ-4СК (фирма «Пластполимер»):

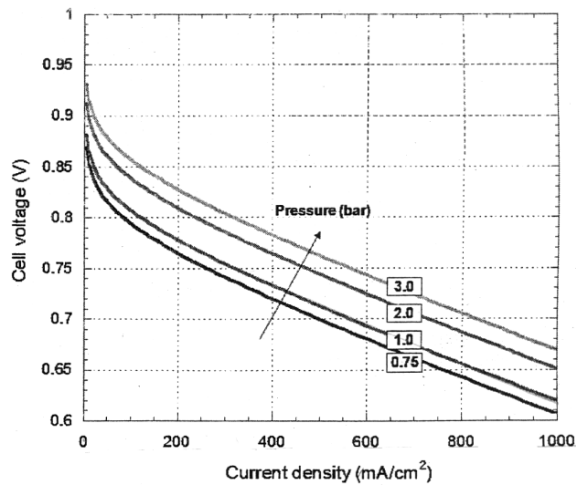
- требуется строгое соблюдение влажностного режима (воздух на входе должен увлажняться до требуемой величины);
- наиболее устойчивая работа наблюдается при плотности тока не более  $0,4 \text{ А/см}^2$ ;
- при плотности тока более  $0,8 \text{ А/см}^2$  наблюдается неустойчивость в работе батареи.

Неустойчивость связана с нарушением влажностного режима работы мембраны и с повышенным тепловыделением в активной зоне. Небольшие отклонения влажности воздуха или расхода воздуха приводят либо к возникновению зон, где мембрана пересыхает, либо к возникновению зон, где образуется чрезмерное скопление воды, блокирующей поверхность мембраны от контакта с воздухом.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

При расчете батареи ТПТЭ в качестве типичных характеристик ТПТЭ, использовались вольтамперные характеристики (ВАХ) ТПТЭ приведенные в работе [2]. Они представлены на рис. 4. ВАХ при расчетах

использовались согласно методике, предложенной в [3].



**Рис. 4.** Вольтамперные характеристики ТПТЭ при разных давлениях и температуре 75°C

Недостатком данной зависимости является отсутствие учета влияния на ВАХ коэффициента избытка окислителя, а также концентрации кислорода в окислителе. При анализе энергетических установок (ЭУ) на базе ТПТЭ требуется обоснованно подойти к выбору коэффициента избытка воздуха в ТПТЭ, а для ЭУ с кислородно-водородной батареей ТПТЭ необходимо также учесть концентрацию кислорода в окислителе.

В значительной степени влияние этих факторов обусловлено зависимостью электродвижущей силы (ЭДС) от среднего парциального давления кислорода в катодной полости ТЭ. При замене воздуха на чистый кислород парциальное давление кислорода значительно возрастает и, как следствие, возрастает ЭДС ТЭ. Для учета влияния указанных факторов на ВАХ производилась коррекция напряжения по специально разработанной методике. Методика приведена в работе [4] и здесь ввиду ограниченности объема статьи не приводится.

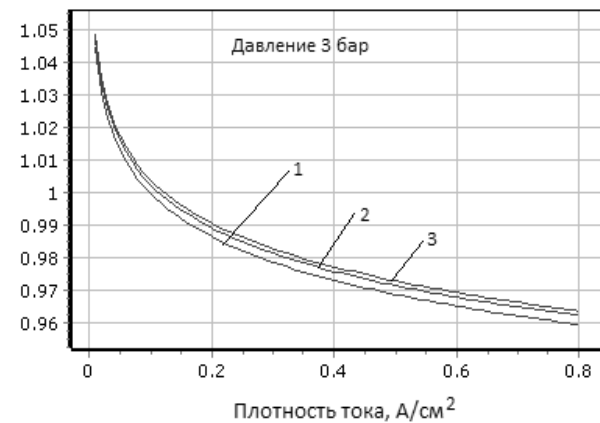
На рис. 5 показано влияние коэффициента избытка воздуха на ВАХ. На рис. 6 представлено влияние концентрации кислорода на ВАХ.

Объектом рассмотрения является ЭУ на базе ТПТЭ мощностью 50 кВт. Топливо – газообразный водород. Окружающее давление 1 атм. Окружающая температура 288,15 К.

Основными задачами исследования являются термодинамический расчет и выбор рациональных параметров 3 альтернативных схем ЭУ на базе:

- схема 1 – водородно-воздушной батареи ТПТЭ с турбокомпрессором и камерой сгорания, работающей на H<sub>2</sub> и воздухе (рис. 7);
- схема 2 – водородно-воздушной батареи ТПТЭ с компрессором, приводимым в движение электродвигателем (рис. 8);
- схема 3 – водородно-кислородной батареи ТПТЭ с баллонной подачей H<sub>2</sub> и O<sub>2</sub> (рис. 9).

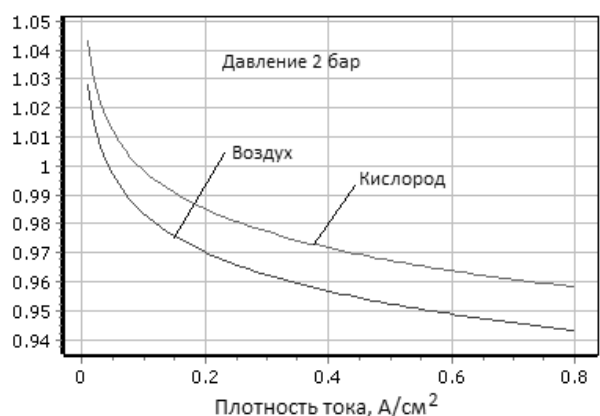
Напряжение, В



**Рис. 5.** Влияние коэффициента избытка воздуха в ТПТЭ на ВАХ

Коэффициент избытка воздуха: 1 – 1,0; 2 – 3,0; 3 – 5,0. Давление 3 бар. Окислитель – воздух

Напряжение, В



**Рис. 6.** Влияние концентрации кислорода в окислителе на ВАХ ТПТЭ

Коэффициент избытка окислителя: 1,5.  
Давление 2 бар

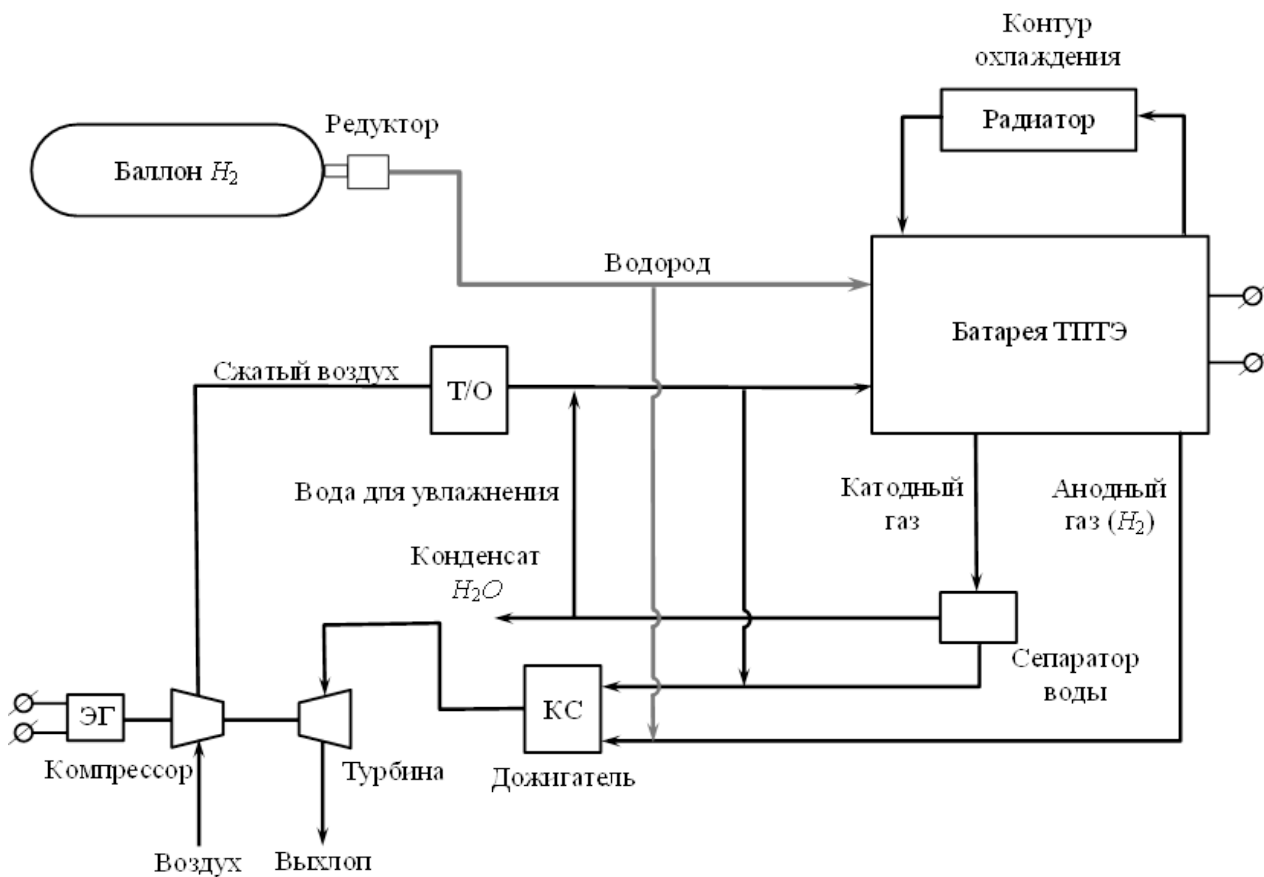


Рис. 7. ЭУ на базе водородно-воздушной батареи ТПТЭ с турбокомпрессором (схема 1)

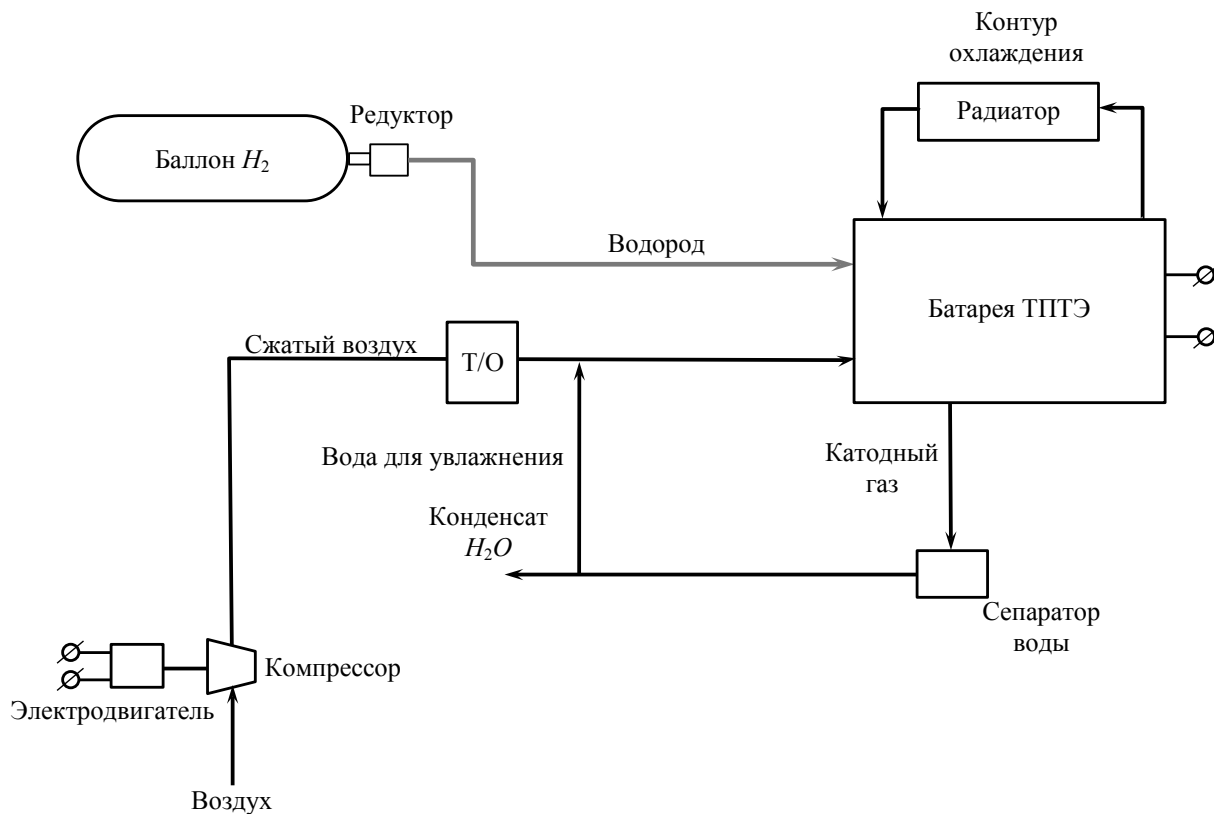


Рис. 8. ЭУ на базе водородно-воздушной батареи ТПТЭ с компрессором (схема 2)

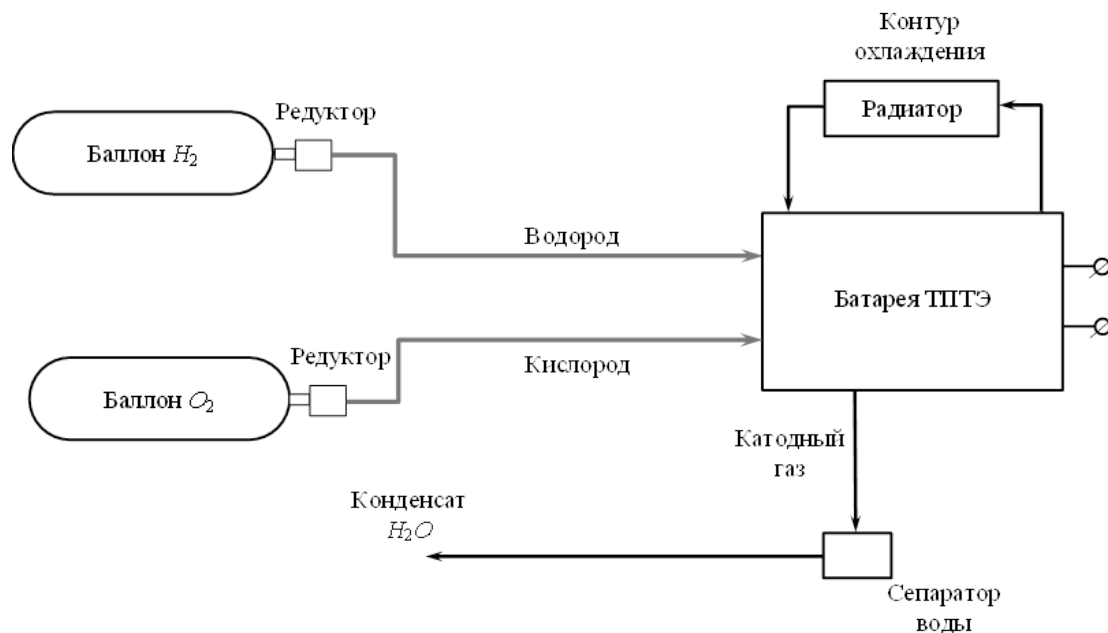


Рис. 9. ЭУ на базе водородно-кислородной батареи ТПТЭ с баллонной подачей  $H_2$  и  $O_2$  (схема 3)

Для выбора основных параметров ЭУ на базе ТПТЭ проводились оптимизационные расчеты по математической модели разработанной авторами в [3]. В качестве критерия оптимизации рассматривался КПД ЭУ. Направление поиска – максимизация. В качестве варьируемых переменных рассматривались параметры, представленные в табл. 1. Ограничивающие параметры представлены в табл. 2. Коэффициент использования кислорода (другими словами коэффициент избытка окислителя в батарее) по рекомендациям должен быть не более 0,5–0,6 [2], чтобы не допускать больших потерь из-за концентрационного перенапряжения. Кроме того, для надежного выноса конден-

сированной воды (продукта электрохимической реакции) из каналов ячейки ТПТЭ требуется достаточная скорость воздуха, а значит и расход воздуха. Исходные данные для расчета представлены в табл. 3.

В результате решения оптимизационной задачи получены оптимальные параметры, которые представлены в табл. 4–6 соответственно для схем 1–3.

Из результатов расчета видно, что наибольший КПД (0,667) имеет кислородно-водородная ЭУ (схема 3), а среди воздушно-водородных ЭУ наибольший КПД (0,556) имеет ЭУ с использованием электродвигателя в качестве привода компрессора (схема 2).

Таблица 1

Варьируемые переменные

Параметр	Минимальное значение	Максимальное значение
Схема 1		
Степень повышения давления в компрессоре	1,5	4,0
Доля воздуха, поступающая в батарею	0,1	1,0
Коэффициент избытка воздуха в камере сгорания	1,0	5,0
Коэффициент избытка воздуха в батарее ТПТЭ	1,5	5,0
Схема 2		
Степень повышения давления в компрессоре	1,5	4,0
Коэффициент избытка воздуха в батарее ТПТЭ	1,5	4,0
Схема 3		
Давление в батарее, атм	1,5	8,0

Таблица 2

**Ограничивающие параметры**

<i>Параметр</i>	<i>Значение</i>
Температура перед турбиной, К	$\leq 1200$
Мощность электрогенератора, кВт	$\geq 0$

Таблица 3

**Исходные данные**

<i>Общие параметры</i>	<i>Значение</i>
Окружающая температура, °С	15,0
Окружающее давление, атм	1,0
Мощность ЭУ, кВт	50,0
Топливо	водород
Окислитель	воздух
Параметр компрессора	Значение
КПД компрессора	0,7
Параметр электрогенератора	Значение
КПД электрогенератора	0,9
Параметры увлажнителя воздуха	Значение
Коэффициент восстановления полного давления	0,96
Увлажнение до точки росы, °С	60
Температура воды для увлажнения, °С	25
Параметры батареи ТПТЭ	Значение
Температура батареи, °С	75
Коэффициент восстановления полного давления	0,94
Температура охладителя (воды) начальная, °С	25
Плотность тока, А/см <sup>2</sup>	0,4
Коэффициент избытка воздуха	1,2
Коэффициент восстановления полного давления	0,96
Напорность насоса охладителя, атм	0,5
КПД насоса охладителя	0,75
Параметр сепаратора воды	Значение
Коэффициент восстановления полного давления	0,96
Параметр камеры сгорания	Значение
Коэффициент восстановления полного давления	0,950
Полнота сгорания	1,0
Параметры турбины	Значение
КПД эффективный	0,7
КПД механический	0,97

Таблица 4

**Результаты оптимизации схемы 1 ЭУ**

<i>Тип параметра</i>	<i>Параметр</i>	<i>Значение</i>
Критерий	КПД ЭУ	0,451
Переменные	Степень повышения давления в компрессоре	3,281
	Доля воздуха, поступающая в батарею	0,922
	Коэффициент избытка воздуха в камере сгорания	1,092
	Коэффициент избытка воздуха в батарее ТПТЭ	1,50
Ограничивающие параметры	Температура перед турбиной, °С	896,2
	Мощность электрогенератора, кВт	0,0

Таблица 5

**Результаты оптимизации схемы 2 ЭУ**

<i>Тип параметра</i>	<i>Параметр</i>	<i>Значение</i>
Критерий	КПД ЭУ	0,556
Переменные	Степень повышения давления в компрессоре	3,10
	Коэффициент избытка воздуха в батарее	1,50

Таблица 6

## Результаты оптимизации схемы 3 ЭУ

Тип параметра	Параметр	Значение
Критерий	КПД ЭУ	0,665
Переменные	Давление в батарее, атм	8,0

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, при использовании в качестве исходного топлива водорода ТПТЭ представляют значительный интерес для ЭУ. При использовании водорода ТПТЭ имеют КПД на уровне 50% и простую схему установки, что позволяет достичь высокой удельной мощности (0,8 кВт/кг, а в перспективе 1,5 кВт/кг).

Основной причиной ограничения давления в ТПТЭ является снижение степени увлажнения окислителя и горючего с ростом давления. В связи с этим рабочее давление в батарее оказывается менее 4 атм.

В ЭУ с турбокомпрессором (схема 1) целесообразным является подача воздуха после батареи ТПТЭ в камеру сгорания. Это позволяет существенно повысить КПД по сравнению с вариантом ЭУ со сбросом воздуха после батареи ТПТЭ в окружающую среду.

Наибольший КПД в ЭУ с турбокомпрессором реализуется при условии отсутствия избыточной мощности на турбине, т.е. при условии отсутствия электрогенератора.

При ограниченной степени повышения давления в компрессоре (менее 4) во всех вариантах ЭУ отсутствует необходимость в охлаждении воздуха. Это связано с тем, что существенное понижение температуры воздуха реализуется в увлажнителе.

При увлажнении водорода целесообразно организовать его подогрев за счет тепла сжатого воздуха.

Наибольший КПД (0,667) имеет кислородно-водородная ЭУ (схема 3). Однако необходимо провести исследование по анализу рисков, связанных с эксплуатацией чистого кислорода, а также проблеме выноса реакционной воды из каналов батареи ТПТЭ.

Среди воздушно-водородных ЭУ наибольший КПД (0,556) имеет ЭУ с использованием электродвигателя в качестве привода компрессора (схема 2). При этом батарея должна выдавать избыточную мощность.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **EG&G Technical Services, Inc.** Fuel Cell Handbook (Seventh Edition). USA: U.S. Department of Energy, 2004, 427 p. [ EG&G Technical Services, Inc. Fuel Cell Handbook (Seventh Edition). USA: U.S. Department of Energy, 2004. ]
2. **Campanari S., Manzolini G., Beretti A., Wollrab U.** Performance Assessment of Turbocharged Pem Fuel Cell Systems for Civil Aircraft Onboard Power Production // ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2008, Vol. 130, no. 2, pp. 1-7. [ S. Campanari, G. Manzolini, A. Beretti, U. Wollrab, "Performance Assessment of Turbocharged Pem Fuel Cell Systems for Civil Aircraft Onboard Power Production," in ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, vol. 130, no. 2, pp. 1-7, 2008. ]
3. **Захаренков Е. А.** Исследование и оптимизация схем и параметров гибридных электростанций на основе топливных элементов и газотурбинных установок // Автореф. дис. канд. техн. наук. М.: МЭИ (ТУ), 2009. 20 с. [ Ye. A. Zakharenkov, Research and optimization of schemes and parameters of hybrid power plants based on top-leaf elements and gas turbine units, (in Russian). The abstract for the Ph.D. thesis, Moscow: MEI (TU), 2009. ]
4. **Рахманкулов Д. Я., Захарченко В. С., Сунцов П. С.** Комплексная математическая модель формирования облика ТВГТД в системе вертолета // Сборник докладов Восьмой Всероссийской конференции молодых ученых и специалистов «Будущее машиностроения России». 2015. С. 565-569. [ D. Ya. Rakhmankulov, V.S. Zakharchenko, P.S. Suntsov, "Complex mathematical model of formation of the TVGTD display in the helicopter system," (in Russian), in Collection of reports of the Eighth All-Russian Conference of Young Scientists and Specialists "The Future of Mechanical Engineering of Russia", Moscow, Russia, 2015, pp. 565-569. ]

## ОБ АВТОРАХ

**АВЕРЬКОВ Игорь Сергеевич**, науч. сотр. отдела «Специальные авиационные двигатели и химмотология».

**БАЙКОВ Алексей Витальевич**, нач. сектора отдела «Специальные авиационные двигатели и химмотология».

**ЗАХАРЧЕНКО Виктор Савельевич**, зам. нач. отдела «Электрические (гибридные) силовые установки, системы и летательные аппараты», канд. техн. наук, доц.

**СЕЛИВАНОВ Олег Дмитриевич**, главный научный сотрудник отдела «Оценка эффективности применения силовых установок на ЛА различного назначения», канд. техн. наук.

**METADATA**

**Title:** Calculation studies in application of on-board power unit based on proton-exchange membrane fuel cell bench demonstrator development.

**Authors:** I. S. Averkov<sup>1</sup>, A. V. Baikov<sup>2</sup>, V. S. Zakharchenko<sup>3</sup>, O. D. Selivanov<sup>4</sup>

**Affiliation:**

Central Institute of Aviation Motors (CIAM), Russia.

**Email:** <sup>1</sup>averkov@ciam.ru, <sup>2</sup>baikov@ciam.ru, <sup>3</sup>zvs002@ciam.ru, <sup>4</sup>selivanov@ciam.ru

**Language:** Russian.

**Source:** Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University), vol. 22, no. 1 (79), pp. 36-43, 2018. ISSN 2225-2789 (Online), ISSN 1992-6502 (Print).

**Abstract:** The article is devoted to the development of a mathematical model that allows to estimate the effectiveness on-board power unit (PU) based on proton exchange membrane fuel cell (PEMFC) use as an aircraft auxiliary power unit. Preliminary calculations showed that the highest efficiency of the schemes considered has an oxygen-hydrogen power unit. The highest efficiency of the air-hydrogen power plants is achieved by the use of an electric motor as a compressor drive.

**Key words:** Auxiliary power plant; fuel cell; power unit; efficiency.

**About authors:**

**AVERKOV, Igor Sergeevich**, Researcher of the department 009 "Special aircraft engines and chemotherapy".

**BAIKOV, Aleksey Vitalievich**, Head of the sector of department 009 "Special aircraft engines and chemotherapy", Ph.D.

**ZAKHARCHENKO, Viktor Savelievich**, Deputy Head of Department 006 "Electric (hybrid) power plants, systems and aircrafts", Ph.D., associate professor.

**SELIVANOV, Oleg Dmitrievich**, Chief Researcher of Department 002 "Assessment of the effectiveness of the use of power plants for aircrafts for various purposes", Ph.D.