

УДК 620.92

DOI: 10.24160/1993-6982-2020-5-47-53

Перспективные осмотическая и гибридная электрохимическая электростанции

Р.С. Цгоев

Рассмотрен спектр энергетических технологий, конечной целью которых является получение электрической энергии. Приводимый перечень источников позволяет изучать их различные комбинации для повышения энергоэффективности новых комплексов. Составлен систематизированный список из 21 известных на сегодняшний день традиционных, нетрадиционных и возобновляемых источников электроэнергии, эффективность (КПД) каждого из которых в отдельности не превышает 50%, кроме некоторых типов энергоустановок на основе топливных элементов (ЭУ/ТЭ). Для указанных видов источников предложены схемы этапов преобразования потоков энергии. Очевидно, что если в той или иной цепочке отсутствуют какие-либо блоки по сравнению с первой классической цепочкой термодинамических циклов тепловых машин, то это значит, что отсутствующие этапы преобразований энергии или реализуются скрытно, или протекают в окружающей среде.

В качестве примера взяты два перспективных источника — осмотическая ГЭС и гибридная энергоустановка (ГибЭУ) на основе высокотемпературных топливных элементов с твердооксидным электролитом и ГТУ. По сути, на осмотической ГЭС происходит изъятие затраченной на испарение воды с морских поверхностей солнечной энергии в виде энергии явления осмотического давления при односторонней диффузии молекул речной пресной воды (растворителя) через полупроницаемую мембрану в сторону морской соленой воды (раствора). Осмотическая ГЭС представляет собой сочетание резервуара с полупроницаемыми мембранами и ГЭС. Для первого характерна ожидаемая высокая удельная мощность до 12 кВт на квадратный метр площади полупроницаемых мембран, для второго — самый высокий КПД из всех видов источников электроэнергии и достигнутая высокая удельная мощность до 2...3 кВт на квадратный метр площади поверхности твердооксидного электролита.

Ключевые слова: осмотическая ГЭС, топливный элемент с твердооксидным электролитом, источники электрической энергии.

Для цитирования: Цгоев Р.С. Перспективные осмотическая и гибридная электрохимическая электростанции // Вестник МЭИ. 2020. № 5. С. 47—53. DOI: 10.24160/1993-6982-2020-5-47-53.

Promising Osmotic and Hybrid Electrochemical Power Plants

R.S. Tsgoev

A range of energy technologies ultimately aimed at obtaining electric energy is considered. Proceeding from the list of considered sources, it is possible to analyze their different combinations for achieving better energy efficiency of new complexes. A systematic list of 21 currently known traditional, non-traditional, and renewable energy sources is compiled. Each of them taken individually has an efficiency not exceeding 50%, except for some types of fuel cell based power facilities. Block diagrams of energy flow conversion stages are proposed for the considered kinds of sources. Obviously, if some or other chain does not contain certain blocks in comparison with the first classical chain of thermal engine thermodynamic cycles, this means that the missing energy conversion stages of are either implemented covertly, or proceed in the environment.

As an example, two promising sources are considered: an osmotic hydroelectric power plant and a hybrid power plant (HybPP) based on high-temperature fuel cells with solid oxide electrolyte and a gas turbine unit. In fact, an osmotic hydroelectric power plant takes the solar energy spent for evaporation from sea surfaces in the form of the osmotic pressure phenomenon energy under the conditions of one-way diffusion of fresh river water (a solvent) molecules through a semi-permeable membrane towards salt sea water (a solution). An osmotic HPP is a combination of a reservoir with semi-permeable membranes and an HPP. The former is characterized by the expected high specific power up to 12 kW per square meter of semi-permeable membrane area, and the latter is characterized by the highest efficiency among all types of electric power sources and by the high achieved specific power up to 2...3 kW per square meter of solid oxide electrolyte surface area.

Key words: osmotic HPP, fuel cell with solid oxide electrolyte, electric energy sources.

For citation: Tsgoev R.S. Promising Osmotic and Hybrid Electrochemical Power Plants. Bulletin of MPEI. 2020;5:47—53. (in Russian). DOI: 10.24160/1993-6982-2020-5-47-53.

Введение

Согласно ГОСТ 18311—80, электроэнергетика — отрасль энергетики, включающая в себя производство, передачу и потребление электроэнергии, а источник электрической энергии — электротехническое устройство, преобразующее различные виды энергии в электрическую.

Изучен спектр энергетических технологий, с помощью которых осуществляется процесс получения

электрической энергии. Дан перечень источников, позволяющий составлять различные комбинации для повышения эффективности. Для анализа взяты осмотическая ГЭС и гибридная энергоустановка (ГибЭУ) на основе высокотемпературных топливных элементов с твердооксидным электролитом и ГТУ. Осмотической ГЭС присуща ожидаемая высокая удельная мощность до 12 кВт на квадратный метр площади полупроницаемых мембран, ГибЭУ — самый высокий КПД из всех

видов источников электроэнергии, и достигнутая высокая удельная мощность до 2...3 кВт на квадратный метр площади поверхности твердооксидного электролита.

Цель статьи — систематизация списка традиционных, нетрадиционных и возобновляемых источников электроэнергии, создание схемы этапов преобразования в них потоков энергии, что позволит рационально использовать новые комбинации с существенно повышенной эффективностью.

Список включает традиционные, нетрадиционные и возобновляемые источники энергии, эффективность (КПД) каждого из которых в отдельности не превышает 50%, кроме некоторых типов энергоустановок на основе топливных элементов (ЭУ/ТЭ). Однако рационально созданные комбинации существенно повышают общую эффективность. Так, известные и широко применяемые двухэлементные парогазовые установки (ПГУ) позволяют достичь электрического КПД более 60%. Для сравнения, у работающих отдельно паросиловых установок с циклом Ренкина КПД обычно находится в пределах 33...45%, для газотурбинных установок с циклом Брайтона — в диапазоне 28...42%. Японская Корпорация МНН разрабатывает трехэлементную гибридную энергоустановку электрической мощностью 100 МВт, состоящую из твердооксидного ЭУ/ТЭ, газовой и паровой турбин с суммарным электрическим КПД 70%.

Перечислим виды источников энергии, выполненных с использованием электрических генераторов переменного или постоянного тока, и источников с выходом только на постоянном токе.

1. АЭС (атомная электростанция — сочетание атомного реактора в качестве источника тепла и термодинамического цикла Ренкина).

2. КЭС (конденсационная электростанция, ТЭС — теплоэлектростанция — сочетание парового котла на углеводородном топливе в качестве источника тепла и термодинамического цикла Ренкина. Сюда же можно отнести гидротермальные электростанции, использующие в качестве источника тепла градиент температур поверхностных и глубинных вод океана).

3. ТЭЦ (теплоэлектроцентраль — то же, что и КЭС, но с дополнительной выдачей тепла в виде пара).

4. ГТУ (газотурбинная электростанция — сочетание компрессора и газовой турбины с реализацией термодинамического цикла Брайтона на основе углеводородного топлива).

5. ПГУ (парогазовая установка, ГТУ+ТЭС — сочетание термодинамических циклов Брайтона и Ренкина, КПД > 60%).

6. ДГУ (дизель-генераторная установка с реализацией термодинамического цикла Дизеля на основе углеводородного топлива).

7. ГЭС (гидроэлектростанция на основе энергии гравитационного поля Земли, относится к возобновляемой энергетике).

8. ВЭУ (ветроэнергетическая установка основана на использовании кинетической энергии перемещения воздушных масс из-за температурно-барического градиента).

9. ГТЭС (геотермальная электростанция — реализация термодинамического цикла Ренкина с использованием тепла Земли).

10. СЭС (гелиотермическая электростанция с использованием видимого и инфракрасного диапазонов электромагнитного излучения Солнца в качестве первоисточников тепла с реализацией термодинамического цикла Ренкина).

11. ПЭС (приливная гидроэлектростанция на базе колебаний уровня водной поверхности из-за колебаний энергии гравитационного поля Земли и Луны с применением как потенциальной, так и кинетической энергии приливных течений).

12. БЭС (биоэлектростанция — работа на первичной и вторичной биомассах с реализацией термодинамического цикла Ренкина: первичная — вид углеводородного топлива, выраженный накопленной энергией излучения Солнца, вторичная — бытовые отходы).

13. ВЭС (волновая электростанция на основе кинетической и потенциальной энергий колебаний водной поверхности из-за температурно-барических колебаний воздушных масс).

14. МГЭС (малые ГЭС на базе энергии гравитационного поля Земли, следствием которого является и потребление кинетической энергии стоков рек).

15. ФЭС (фотоэлектрическая электростанция — прямое преобразование в электроэнергию энергии электромагнитного излучения Солнца).

16. МГДС (магнитогидродинамическая электростанция — прямое преобразование в электроэнергию энергии прохождения плазмы или ионизированного газа через поперечное магнитное поле).

17. ТЭП (термоэмиссионный преобразователь — прямое преобразование в электроэнергию энергии тепла нагретого катода посторонним источником тепла на основе использования эффекта термоэлектронной эмиссии).

18. ТЭГ (термоэлектрический генератор — реализация эффекта Зеебека прямого преобразования тепловой энергии в электрическую энергию при применении термоэлектрических материалов).

19. ЭХС (электрохимическая станция на основе топливных элементов — реализация эффекта прямого преобразования энергии химических реакций в электрическую энергию).

20. Пьезоэлектрический источник, основанный на эффекте прямого преобразования энергии давления в электрическую энергию при формировании электрических зарядов на гранях при сжатии либо растяжении отдельных кристаллов естественного происхождения.

21. ОГЭС (осмотическая бесплотинная ГЭС на основе явления осмоса).

Источники № 1 — 14, 21 используют электрические генераторы переменного или постоянного тока, а № 8 — 15, 21 — возобновляемые источники энергии. Источники № 15 — 19 являются источниками энергии постоянного тока, а № 20 — переменного тока.

Приведем список видов накопителей, применяемых в электроэнергетике (основаны на виде энергии, в котором осуществляется собственно накопление).

1. Кинетические (маховичные).
2. Потенциальные (гидравлические, пневматические, тепловые, пружинные).
3. Электрохимические (аккумуляторные батареи).
4. Электрическое поле (батареи конденсаторов).
5. Магнитное поле (индукционные катушки).
6. Электролизеры совместно с ЭХС (водород).

Накопители № 1, 2 используют электрические генераторы переменного или постоянного тока. Накопители № 4 — 6 являются источниками энергии постоянного тока.

Схемы преобразования энергии различных видов источников

Этапы преобразования потоков энергии для различных видов источников электроэнергии показаны отдельными блоками на рис. 1.

Из схемы рис. 1 следует основной вывод, что если в той или иной цепочке отсутствуют какие-либо блоки (по сравнению с очевидной первой классической цепочкой термодинамических циклов тепловых машин), то это значит, что отсутствующие этапы преобразования энергии или реализуются скрытно, или протекают в окружающей среде. Так, цепочка для ГЭС, ВЭУ, ПЭС, ВЭС содержит лишь два блока, остальные этапы преобразования проходят в окружающей среде.

Рассмотрим два перспективных источника электроэнергии — ЭХС и ОГЭС.

Бесплотинная гидроэлектростанция на эффекте осмоса

На обычных гидроэлектростанциях используется потенциальная энергия пресной речной воды, как следствие испарение воды с морских поверхностей под действием солнечного излучения. По сути, на осмотической ГЭС [1, 2] происходит изъятие затраченной на испарение солнечной энергии в виде энергии осмотического давления при односторонней диффузии молекул речной пресной воды (растворителя) через полупроницаемую мембрану в сторону морской соленой воды (раствора). Осмотическая ГЭС представляет собой сочетание резервуара с полупроницаемыми мем-

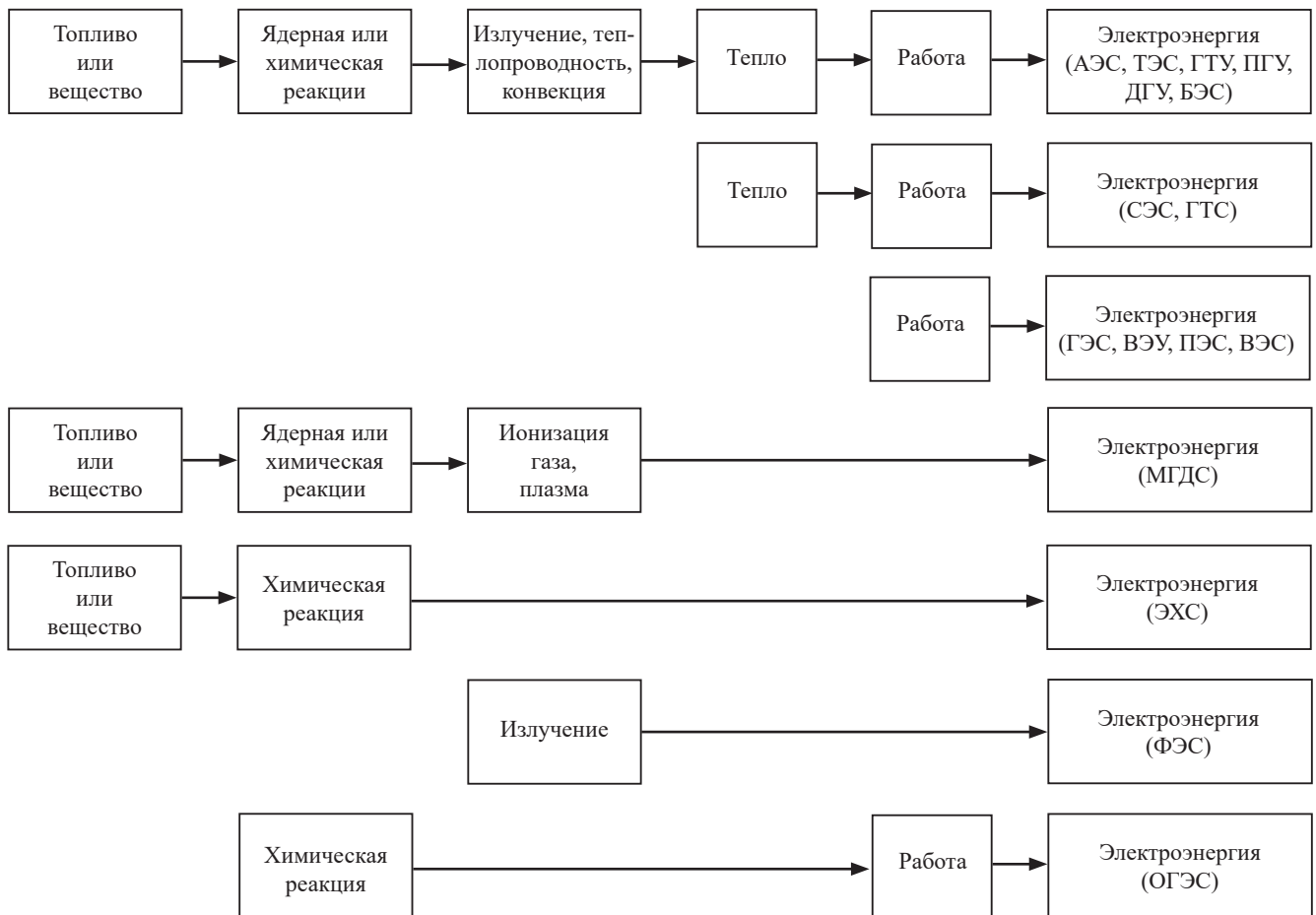


Рис. 1. Схемы этапов преобразования потоков энергии для различных видов источников электроэнергии

бранами и ГЭС. Одна из возможных схем бесплотинной осмотической ГЭС представлена на рис.2.

Рассмотрим принцип работы устройства. В насос 1 подается некий раствор по трубе 2. Под давлением, создаваемым насосом 1, раствор по трубе 3 подается во внутреннюю полость полупроницаемых мембран 4, расположенных в резервуаре 5. Также в резервуаре 5 по трубе 6 попадает (возможно самотеком) растворитель, омывающий мембраны 4 снаружи. Благодаря создающемуся осмотическому давлению растворитель диффундирует через полупроницаемые мембраны 4 и разбавляет концентрацию раствора. Разбавленный раствор под осмотическим давлением и давлением, создаваемым насосом 1, по трубе 7 подается на турбину 8, которая является приводом одновременно насоса 1 и электрогенератора 9, отдающего выработанную электроэнергию в энергосистему. Все три агрегата соединены между собой общим валом, по сути, повторяя схему традиционного газотурбинного устройства. Отработанный разбавленный раствор после турбины 8 попадает по трубе 10 в окружающую среду, куда сбрасывается из резервуара 5 по трубе 11 самотеком часть растворителя, не продиффундировавшего через мембраны 4.

Голландский физик и химик Я. Хенрикус нашел количественное соотношение между осмотическим давлением и концентрацией растворенного вещества, выраженное следующим уравнением:

$$P = CRT, \quad (1)$$

где P — осмотическое давление; C — молярная концентрация растворенного вещества; R — идеальная газовая постоянная; T — абсолютная температура, К.

При использовании в качестве раствора морской воды, а в качестве растворителя — пресной (речной), расчеты показывают, что при солёности морской воды 35 г/литр (0,6 моль/литр в предположении, что вся растворенная соль NaCl) за счет явления осмоса, если перекрыть трубы-водоводы 3 и 7 (т. е. в статике), внутри полости полупроницаемых мембран 4 создается перепад давления 2389464 Пас или около 24 атм. На практике это эквивалентно плотине высотой 240 м.

Примем в динамике (при открытых трубах 3, 7), что насос 1 прокачивает объем морской воды, равный объему пресной воды, диффундирующему через полупроницаемые мембраны 4 в полость, ограниченную ими, из-за осмотического давления. Очевидно, что через указанную полость всегда будет протекать разбавленная морская вода со сниженной в два раза концентрацией соли, и, согласно уравнению (1), осмотическое давление упадет в два раза (эквивалентно плотине высотой 120 м). Отметим, что именно такое давление водного столба должен создавать насос 1 для постоянной прокачки морской воды в полость, ограниченную полупроницаемыми мембранами 4, по прочности рассчитанными на это давление. Равные объемы морской

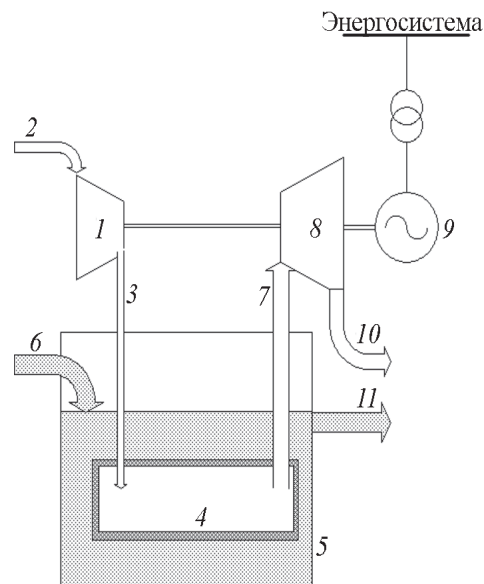


Рис. 2. Схема бесплотинной осмотической ГЭС:

1 — насос; 2, 3, 6, 7, 10, 11 — трубы; 4 — полупроницаемые мембраны; 5 — резервуар; 8 — турбина; 9 — электрогенератор

и речной воды под давлением 120 м вод. ст. развивают на турбине 8 мощность, половина которой при принятых условиях идет на привод насоса 1, а вторая половина — на привод генератора 9. Практически можно считать, что полезную мощность на электрогенераторе создает лишь доля пресной воды, продиффундировавшей в полость через полупроницаемые мембраны 4. Без учета потерь (в идеале) максимальный КПД установки по рис. 3 при этом составит 50%.

Пусть через 1 м² поверхности полупроницаемых мембран 4 диффундирует 10 л пресной воды в течение 1 с. При этом без учета потерь ожидаемая мощность генератора 9 рассматриваемой осмотической ГЭС составит $P = 10 \text{ кг}/(\text{с}\cdot\text{м}^2) \cdot 9,8 \text{ м}/\text{с}^2 \cdot 120 \text{ м} \approx 12 \text{ кВт}/\text{м}^2$, что значительно выше по сравнению с плотностью потока солнечной энергии в 1 кВт/м² или удельной мощностью энергии ветра в 1 кВт/м² при скорости 12 м/с.

Первая в мире опытная осмотическая гидроэлектростанция заработала в Норвегии 24 ноября 2009 г. Она используется для тестирования и улучшения технологии. Установка создана норвежской государственной компанией Statkraft в городке Тофте (Tofte) близ Осло с использованием полиамидных мембран производительностью 10 л пресной воды в секунду под давлением 10 бар на 1 м². По оценкам, коммерческая привлекательность станций начинается с эффективности съема мощности более 5 Вт с квадратного метра мембран. На норвежской станции в Тофте реально это значение едва превышает 1 Вт/м², но уже испытываются мембраны с эффективностью 2,4 Вт/м², ожидается достижение рентабельного значения 5 Вт/м².

Есть обнадеживающая информация из исследовательского центра Франции. Работая с материалами на основе углеродных нанотрубок, ученые получили на

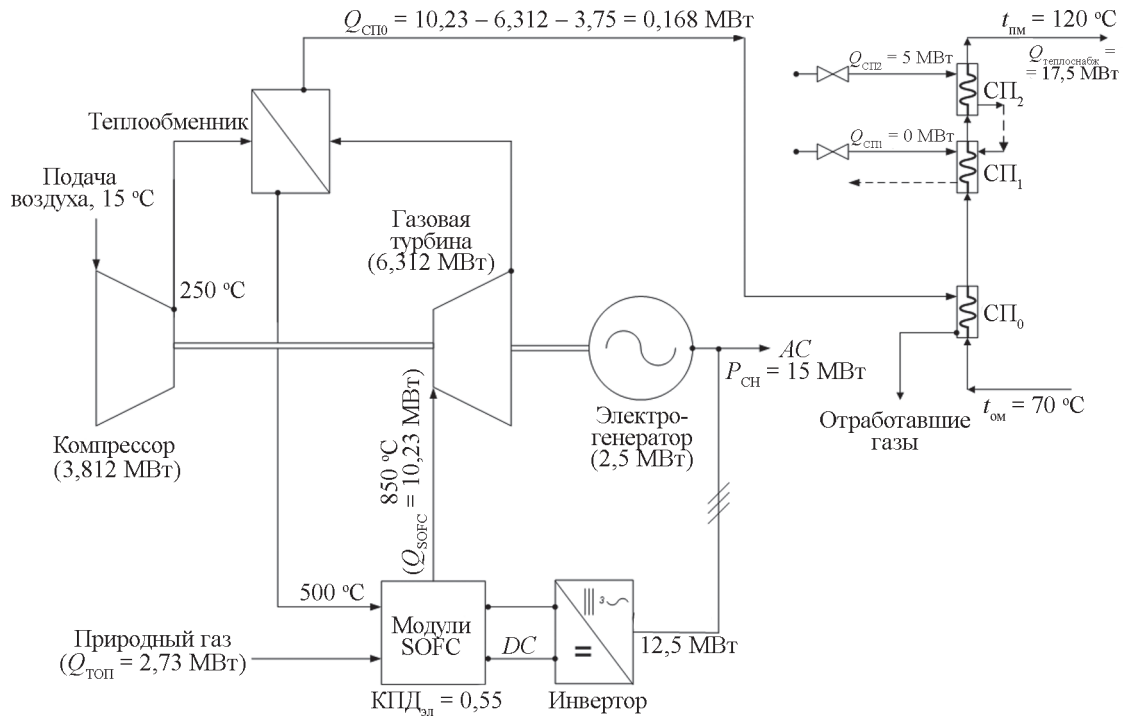


Рис. 3. Твердооксидный топливный элемент в комплексе с ГТУ

образцах эффективность отбора энергии осмоса около 4000 Вт/м².

Еще более впечатляющие перспективы обещает применение графеновых пленок. Мембрана толщиной в один атомный слой становится полностью проницаема для молекул воды, задерживая при этом любые другие примеси. Эффективность такого материала может превышать 10 кВт/м².

В гонку по созданию мембран высокой эффективности включились ведущие корпорации Японии и Америки. Если удастся в течение ближайшего десятилетия решить проблему мембран для осмотических станций, то новый источник энергии займет ведущее место в обеспечении человечества экологически чистыми энергоносителями. В отличие от энергии ветра и солнца установки прямого осмоса могут работать круглые сутки и не зависят от погодных условий.

Гибридная электрохимическая установка на основе твердооксидных топливных элементов

Рассмотрим возможность применения электрохимической станции (ЭХС), представляющей собой сочетание высокотемпературного твердооксидного ЭУ/ТЭ в комплексе с газотурбинной установкой (ГТУ) [3—10], так называемой гибридной энергоустановкой (ГибЭУ), для решения поставленной задачи — генерации электрической энергии. В ГибЭУ ГТУ не обязательно несет электрическую нагрузку. При этом она подает лишь воздух под нужным давлением. В топливных элементах химическая энергия топлива (водород) и окислителя (кислород) преобразуется в электрическую в про-

цессе протекания реакций окисления–восстановления на электродах и путем переноса электронов во внешней цепи. Электрохимический процесс включает в себя несколько стадий: подвод реагента (диффузия), стадию разряда/ионизации, отвод продуктов реакции. Скорость реакции определяется самой медленной стадией.

Как указано в [5], Siemens/Wesinghause ввела в эксплуатацию ГибЭУ мощностью 300 кВт в Италии и Германии. Установки (упрощенная технологическая схема дана на рис. 3) имеют следующие спецификации:

- топливо — природный газ;
- выход — электроэнергия на переменном токе, горячие газы на выходе модулей ЭУ/ТЭ;
- мощность электрическая ГибЭУ (ЭУ/ТЭ +ГТУ) — 300 кВт (250 кВт + 50 кВт);
- КПД ЭУ/ТЭ (электрический) — 55%;
- шум — менее 90 дБ на расстоянии 9 м;
- габариты — 3,6×3,6×11,7;
- вес — 31000 кг.

Рабочая температура топливных элементов — 1000 °С. Воздух и природный газ в рекуператоре (теплообменнике) нагреваются до 500 °С, а продукты реакции на выходе собственно модулей ЭУ/ТЭ имеют температуру 850 °С и давление 6...10 атм. При этом электрическая мощность всей установки — 300 кВт, в том числе мощность (электро-) газотурбинной установки (ГТУ) — 50 кВт.

Основная идея получения ЭУ/ТЭ большой мощности — наращивание числа надежно проработанных модулей топливных элементов. Причем, это практически не влияет на общий КПД установки.

Для оценки возможности применения ЭУ/ТЭ + ГТУ ограничимся оценкой баланса мощностей. Примем, что полная электрическая мощность ЭУ/ТЭ + ГТУ равна 15 МВт. Следовательно, она получается на выходе ГибЭУ (согласно приведенным спецификациям) наращиванием 50 проработанных указанных модулей ЭУ/ТЭ + ГТУ (РГибЭУ = 15 МВт) [5]. ГибЭУ можно выполнить с одной газотурбинной установкой (ГТУ) суммарной мощностью на выходе электрогенератора 2,5 МВт, а мощность (электрическая) на выходе модулей ЭУ/ТЭ составит РЭУ/ТЭ = 12,5 МВт. Тогда тепловая мощность топлива (природного газа) на входе модулей ЭУ/ТЭ равна $Q_{\text{топл}} = 12,5/0,55 = 22,73$ МВт (примем для упрощения, что инвертор идеален), а тепловая мощность на выходе составит $Q_{\text{ЭУ/ТЭ}} = Q_{\text{топл}} - P_{\text{ЭУ/ТЭ}} = 22,73 - 12,5 = 10,23$ МВт. Она затрачивается на привод газовой турбины P_T и на нагрев воздуха в теплообменнике $Q_{\text{ТО}}$, а избыток направляется в сетевой подогреватель $C_{\text{по}}$ бытовых потребителей (см. рис. 3). Определим мощность $Q_{\text{ТО}}$, затрачиваемую на нагрев воздуха в теплообменнике. Для этого воспользуемся методом расчета универсальных характеристик ГТУ [7]. Температура газа перед турбиной — 850 °С. В номинальном режиме удельная работа турбины $H_T = 409$ кДж/кг, компрессора (отнесенная к 1 кг газа) $H_K = 247$ кДж/кг, электрогенератора $H_{ЭГ} = H_T - H_K = 409 - 247 = 162$ кДж/кг. Примерно в таком же соотношении выглядят мощности. Поскольку мощность электрогенератора известна и равна $P_{ЭГ} = 2,5$ МВт, то мощность компрессора составит $P_K = (247 \cdot 2,5)/162 = 3,812$ МВт, а мощность турбины — $P_T = (409 \cdot 2,5)/162 = 6,312$ МВт. Тогда расход газа через турбину — $G = P_{ЭГ}/(H_{ЭГ} \cdot \eta_{ЭГ}) = 2,5/(162 \cdot 0,97) \approx 15$ кг/с (где $\eta_{ЭГ}$ — принятый КПД электрогенератора, $\eta_{ЭГ} = 0,97$). Температура за компрессором равна 523 К (250 °С). Для нагрева воздуха с 250 до 500 °С требуется в теплообменнике из горячих

газов после газовой турбины отобрать тепловую мощность, равную

$$Q_{\text{ТО}} = GC_{\text{воз}}(t_{\text{max}} - t_{\text{min}}) = 15 \text{ кг/с} \cdot 1,003 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)} \cdot (500 - 250 \text{ } ^\circ\text{C}) = 3,75 \text{ МВт,}$$

где $C_{\text{воз}} = 1,003$ кДж/(кг·град) — теплоемкость воздуха.

Доля тепловой мощности, подаваемой в сетевой подогреватель $C_{\text{по}}$, равна $Q_{\text{СПО}} = Q_{\text{ЭУ/ТЭ}} - P_T - Q_{\text{ТО}} = 10,23 - 6,312 - 3,75 = 0,168$ МВт. Этого результата следовало ожидать, поскольку при классическом исполнении ЭУ/ТЭ + ГТУ всегда сбалансирована по потокам мощности. При необходимости для увеличения доли тепловой мощности следует повысить расход топлива (метана) на входе ЭУ/ТЭ и температурный режим установки.

Заключение

Составлен систематизированный список известных на сегодняшний день традиционных, нетрадиционных и возобновляемых источников электроэнергии, эффективность (КПД) каждого из которых в отдельности не превышает 50%, кроме некоторых типов энергоустановок на основе топливных элементов (ЭУ/ТЭ).

Для указанных источников составлены схемы этапов преобразования потоков энергии.

Рассмотрены два перспективных источника электроэнергии — ЭХС на основе ОГЭС и ГибЭС. Для первой характерна ожидаемая высокая удельная мощность, для второй — самый высокий КПД и достигнутая высокая удельная мощность.

Систематизированный список традиционных, нетрадиционных и возобновляемых источников энергии и их схемы позволяют рационально создавать комбинации отдельных источников, существенно повышая общую эффективность новых комплексов.

Литература

1. Полинг Л. Общая химия. М.: Мир, 1974.
2. Канарев Ф.М. Начала физхимии микромира. Т. 1, 2. Краснодар: Изд-во Кубанского гос. аграрного ун-та, 2009.
3. Твайделл Дж., Уэйр А. Возобновляемые источники энергии. М.: Энергоатомиздат, 1990.
4. Да Роза А. Возобновляемые источники энергии. Физико-технические основы. М.: Издат. дом МЭИ, 2010.
5. Коровин Н.В. Топливные элементы и электрохимические энергоустановки. М.: Изд-во МЭИ, 2005.
6. Справочник по проектированию электрических сетей / под редакцией Д.Л. Файбисовича. М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2006. С. 67—68.
7. Костюк А.Г., Шерстюк А.Н. Газотурбинные установки. М.: Высшая школа, 1979.
8. Попель О.С., Тарасенко А.Б., Филипов С.П. Энергоустановки на основе топливных элементов: со-

References

1. Poling L. Obshchaya Khimiya. M.: Mir, 1974. (in Russian).
2. Kanarev F.M. Nachala Fizkhimii Mikromira. T. 1, 2. Krasnodar: Izd-vo Kubanskogo Gos. Agrarnogo Un-ta, 2009. (in Russian).
3. Tsvaydell Dzh., Ueyr A. Vozobnovlyaemye Istochniki Energii. M.: Energoatomizdat, 1990. (in Russian).
4. Da Roza A. Vozobnovlyaemye Istochniki Energii. Fiziko-tekhicheskie Osnovy. M.: Izdat. Dom MEI, 2010. (in Russian).
5. Korovin N.V. Toplivnye Elementy i Elektrokhimicheskie Energoustanovki. M.: Izd-vo MEI, 2005. (in Russian).
6. Spravochnik po Proektirovaniyu Elektricheskikh Setey. Pod Red. D.L. Faybisovicha. M.: Izd-vo NTS ENAS, 2006:67—68. (in Russian).
7. Kostyuk A.G., Sherstyuk A.N. Gazoturbinnye Ustanovki. M.: Vysshaya Shkola, 1979. (in Russian).
8. Popel' O.S., Tarasenko A.B., Filipov S.P. Energo-ustanovki na Osnove Toplivnykh Elementov: Sovremennoe

временное состояние и перспективы // Теплоэнергетика. 2018. № 12. С. 5—23.

9. **Бредихин С.И. и др.** Стационарные энергетические установки с топливными элементами: материалы, технологии, рынки. М: Из-во НТФ «Энергопрогресс», 2017.

10. **Дамаскин Б.Б., Петрий О.А., Цирлина Г.А.** Электрохимия. М.: Химия, Изд-во «Колос-с», 2006.

Sostoyanie i Perspektivy. Teploenergetika. 2018;12:5—23. (in Russian).

9. **Bredikhin S.I. i dr.** Statsionarnye Energeticheskie Ustanovki s Toplivnymi Elementami: Materialy, Tekhnologii, Rynki. M: Iz-vo NTF «Energoprogress», 2017. (in Russian).

10. **Damaskin B.B., Petriy O.A., Tsirlina G.A.** Elektrokimiya. M.: Khimiya, Izd-vo «Kolos-s», 2006. (in Russian).

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:

Tsgoiev 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: 27.12.2019

The article received to the editor: 27.12.2019