

УДК 621.352

<https://www.doi.org/10.47813/dnit.4.2025.1005>

EDN

[UIARRZ](#)

## Гибридный подход в моделировании интегрированной системы высокотемпературный твердооксидный топливный элемент-микрогазовая турбина

**Ф.Р. Гайнутдинов\*, Д.Ф. Гайнутдинова**

Казанский государственный энергетический университет, ул. Красносельская,  
51, Казань, 420066, Россия

\*E-mail: [ebkkk@yandex.ru](mailto:ebkkk@yandex.ru)

**Аннотация.** В статье представлена цифровая модель мембранно-электродного блока твердооксидного топливного элемента (ТОТЭ), учитывающая гидродинамику, массоперенос, а также электрохимические и тепловые эффекты в структуре элемента. Рассмотрен гибридный подход к моделированию, повышающий точность прогнозирования производительности топливных элементов, и снижающий затраты на вычисления.

**Ключевые слова:** твердооксидный топливный элемент (ТОТЭ), микрогазовая турбина (МГТ), гибридная энергетическая система.

## Hybrid approach in modeling the integrated high-temperature solid oxide fuel cell-micro gas turbine system

**F.R. Gainutdinov\*, D.F. Gainutdinova**

Kazan State Power Engineering University, Krasnoselskaya St., 51, Kazan, 420066,  
Russia

\*E-mail: [ebkkk@yandex.ru](mailto:ebkkk@yandex.ru)

**Abstract.** The article presents a digital model of a solid oxide fuel cell (SOFC) membrane-electrode assembly, incorporating hydrodynamics, mass transfer, electrochemical effects, and thermal phenomena within the cell structure. A hybrid modeling approach is discussed, which enhances the accuracy of fuel cell performance prediction while reducing computational costs.

**Keywords:** solid oxide fuel cell (SOFC), micro gas turbine (MGT), hybrid energy system.

## 1. Введение

Новые системы преобразования энергии привлекают все большее внимание во всем мире из-за быстрорастущего и диверсифицированного потребления энергии. Гибридные системы твердооксидный топливный элемент – микрогазовая турбина (ТОТЭ - МГТ) считаются одной из наиболее потенциально перспективных технологий в производстве электроэнергии будущего из-за их благоприятного электрического КПД около 70% и низкого уровня деградации окружающей среды [1]. Химическая энергия в топливе может быть непосредственно преобразована в электрическую энергию в ТОТЭ посредством электрохимических реакций, на которые не распространяются ограничения эффективности Карно.

Высокий диапазон рабочих температур 600-1000 °C в ТОТЭ является ещё одним большим преимуществом, так как позволяет осуществлять внутренний реформинг углеводородного топлива и теоретически обеспечивает возможность интеграции с нисходящими циклами, тем самым повышая гибкость в выборе топлива и общую эффективность гибридной технологии. В свою очередь, соединение с микрогазовой турбиной обеспечивает ТОТЭ условия работы под давлением, благоприятные для рабочего напряжения, и позволяет максимально эффективно использовать выхлопные газы ТОТЭ, вырабатывая дополнительную энергию [2].

Значительное упрощение компоновки систем и вспомогательного оборудования может быть достигнуто за счёт высокой согласованности диапазонов параметров двух устройств, несмотря на их сильно различающиеся характеристики. Например, согласованность уровней давления означает, что между компонентами требуются менее сложные соединения, а радиальные коммерческие микротурбины без охлаждения лопастей могут использоваться для гибридизации при правильной конструкции [3].

Анализ литературных данных показал:

- недостаточную проработку режимов совместной работы ТОТЭ и турбины при переменных нагрузках (например, при пиковых нагрузках или переходных процессах);
- отсутствие комплексных моделей, учитывающих тепловые, электрические и механические взаимовлияния компонентов;
- неизученность влияния микрогазовой турбины на скорость деградации электродов (например, из-за вибраций, перепадов давления);

- недостаток исследований по снижению себестоимости гибридных систем для малой энергетики (бытовое/промышленное применение).

Обозначенные выше практические и теоретические проблемы позволили сформулировать актуальность настоящего исследования – моделирование гибридной системы ТОТЭ-МГТ с применением программного пакета ANSYS Fluent.

## 2. Постановка задачи (Цель исследования)

Целью работы является исследование гибридизации ТОТЭ – МГТ на органическом и альтернативных топливах в технологическом цикле производства электрической и тепловой энергии (рисунок 1).

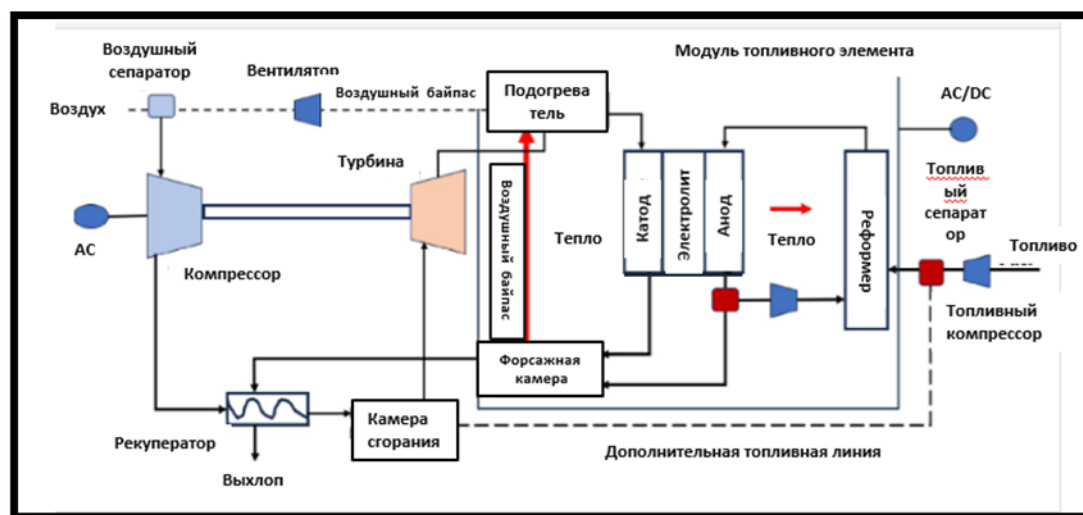


Рисунок 1. Гибридная система ТОТЭ - МГТ.

### 2.1. Математическое моделирование гибрида ТОТЭ-МГТ

В настоящее время активно развивается «цифровое производство», предполагающее точное и надёжное моделирование рабочего цикла энергетического оборудования в виртуальной среде на основе достоверной идентификации характеристик и прогнозирования неизвестных параметров. Цифровые двойники гибридных систем ТОТЭ-МГТ уже исследуются для оптимизации КПД, прогноза износа и снижения эксплуатационных рисков в энергосистемах [4]. Создание цифрового двойника требует детального моделирования компонентов (электрохимические процессы ТОТЭ, термодинамика МГТ); интеграции взаимодействий (теплообмен, управление нагрузкой, синхронизация работы).

### 3. Методы и материалы исследования

Цифровое моделирование выполнялось на персональном компьютере с процессором Intel Xeon Gold, 512 ГБ оперативной памяти и твердотельным накопителем емкостью 1 ТБ для более точного и быстрого математического моделирования.

Расчёты выполнялись с помощью программного обеспечения Ansys 2020 R2, предназначенного для анализа методом конечных элементов. Геометрическая модель блока построена в соответствии со спецификацией. Модель в этом исследовании основана на ТОТЭ на анодной основе, разработанном Ningbo SOFCMAN, Китай. Потoki поступают/выходят из блока топливных элементов через коллекторы. Каждый блок топливных элементов состоит из электролита и пористых электродов с системой газораспределительных каналов и межсоединений, для ячейки из 30 элементов имеется 900 повторяющихся блоков.

В качестве топлива были смоделированы водород, метан/водород ( $\text{CH}_4$  и  $\text{H}_2$ ), а также смесь метана, водорода, воды, угарного газа и углекислого газа являющиеся продуктами переработки отходов нефтепереработки.

### 4. Полученные результаты

Связь с твердооксидными топливными элементами и включение рекуператора существенно изменяют количество независимых переменных в соответствующем уравнении, в то время как количество независимых параметров при моделировании уменьшается, если учитывать проблемы согласования турбомашин. По сравнению с простой гибридизацией, существует всё более сложное взаимное влияние и ограничения между параметрами на входе и выходе, которые связаны процессом рекуперации тепла. Количественный анализ факторов, влияющих на конструкцию турбины, показывает, что эффективность системы повышается на 14-16% с учётом потерь давления в компонентах. При надлежащей конструкции турбины можно достичь электрической эффективности 68% при эффективности рекуператора 0,9. Результаты также показывают значительно расширенные диапазоны рабочих режимов турбомашин при более низкой эффективности рекуператора 0,8 в качестве компенсации за снижение электрической эффективности на 3% в расчётных условиях. На основе анализа работы вне расчётных условий для предлагаемой системы разработана карта характеристик, обеспечивающая стабильное рабочее состояние.

Оптимальное использование топлива из ТОТЭ изменилось с 65% до 55%, когда рабочая температура ТОТЭ снизилась с 835 °С до 635 °С. Максимальная (минимальная) эффективность системы составила 74% (49%) при 65% (90%) использовании топлива в SOFC при температуре 835 °С (635 °С). Результаты показывают, что высокая рабочая температура приводит к высокой эффективности всей гибридной системы, но высокое потребление топлива может привести к снижению эффективности системы.

## 5. Выводы

В рамках данного исследования была создана цифровая модель, объединяющая механическую равновесную работу, электрохимические реакции и другие термодинамические процессы, для получения энергетических и эксплуатационных характеристик гибридных систем с твердооксидными топливными элементами и микрогазовой турбиной. Механизм определения равновесного режима работы предложен как для анализа на этапе проектирования, так и для эксплуатации вне проектных условий посредством повторного анализа классических требований к совместимости скорости и расхода.

## Список литературы

1. Huang, Y. Mechanical Equilibrium Operation Integrated Modelling of Recuperative Solid Oxide Fuel Cell – Gas Turbine Hybrid Systems: Design Conditions and Off-Design Analysis / Y. Huang, A. Turan // Applied Energy. – 2021. – Vol. 283. – P. 116237.
2. Гайнутдинов, Ф.Р. Твердооксидные топливные элементы в гибридных системах энергоснабжения / Ф.Р. Гайнутдинов // Тинчуринские чтения-2023 «Энергетика и цифровая трансформация»: материалы Международной молодежной научной конференции (г. Казань, 26-28 апреля 2023 г.). – 2023. – Т. 2. – С. 39-42.
3. Гайнутдинов, Ф. Р. Применение газовых турбин малой мощности в гибридных энергоустановках / Ф. Р. Гайнутдинов, Д.Ф. Гайнутдинова // XXV Всероссийская студенческая научно-практическая конференция Нижневартковского государственного университета. – 2023. – Ч. 2. – С. 83-87.
4. Fuel Cell System Modeling for Solid Oxide Fuel Cell/Gas Turbine Hybrid Power Plants, Part I: Modeling and Simulation Framework // Journal of Power Sources. – 2011. – Vol. 196. – P. 1205-1215.