

А. А. Лоскутников, И. М. Горюнов, Ф. Г. Бакиров

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КЭУ НА ОСНОВЕ ГТУ И ТОТЭ В КОМПЬЮТЕРНОЙ СРЕДЕ

Рассмотрены пути повышения эффективности ГТЭ-10/95 при совместной работе с ТОТЭ в составе КЭУ. Проведен анализ результатов расчетных исследований двух схем КЭУ с ТОТЭ на номинальном режиме и дроссельных характеристик. *Комбинированные энергоустановки; твердооксидные топливные элементы; пароводяная конверсия*

1. СПОСОБЫ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ГТУ

При реконструкции ТЭС и котельных, для покрытия увеличивающегося дефицита электрической и тепловой энергии внедряются ГТУ на базе конвертированных авиационных ГТД. Необходимо совершенствовать старые и создавать новые перспективные методы конвертирования в основном для уменьшения потерь тепла с уходящими газами, а также повышать эффективный КПД установок [7, 8].

Авиационные ГТД могут быть конвертированы в ЭУ в связи с наличием ряда преимуществ:

- малая остаточная стоимость после эксплуатации «под крылом»;
- небольшие габариты и масса способствуют размещению ГТД в имеющихся помещениях ТЭС и котельных, позволяют осуществлять ремонт за меньшее время;
- высокая приемистость, т. е. выход на режим в течение 2–3 мин, что позволяет быстро «подхватывать» пиковые режимы;
- возможность дистанционного управления режимами.

На базе авиационных ГТД созданы газотурбинные приводы, которые успешно эксплуатируются на газоперекачивающих станциях для привода нагнетателя природного газа, в энергетике – для привода электрогенератора [10].

Конвертируемые ГТД чаще всего создаются на базе авиационных двигателей, принадлежащих к предыдущим поколениям, следовательно, обладающих умеренными параметрами рабочего процесса, высокой температурой уходящих газов и достаточно низким эффективным КПД порядка 25–30 % [10]. Остро встает проблема

утилизации теплоты, теряемой с уходящими газами в атмосферу.

Известны следующие способы повышения эффективности ГТУ [10]:

- форсирование параметров цикла;
- усложнение термодинамического цикла;
- впрыск воды, водяного пара в проточную часть ГТУ.

Значительно повысить эффективность выработки электроэнергии на органическом топливе возможно с применением комбинированных энергоустановок (КЭУ) на основе ГТУ и топливных элементов (ТЭ). Отличительной способностью ТЭ является возможность производить как электроэнергию, так и теплоту, которую можно использовать в циклах ГТУ, ПТУ или ПГУ.

В США над созданием ТЭ и КЭУ на базе ТЭ работают основные конкурирующие промышленные компании: Cummins-SOFCo, Delphi-Battelle, General Electric (GE), Siemens Westinghouse (SW), Acumentrics и FuelCell Energy (FCE), в Европе: Forschungszentrum Jülich (Германия) и Riso National Laboratory (Дания). В России развитие энергосистем на ТЭ поддерживает Роснаука, Минатом и возможно, поддержит Роснотех [7, 8].

По данным работ [5, 7, 8] КПД по выработке электроэнергии КЭУ на базе ГТУ и ТЭ может достигать более 70 %. Диапазон мощностей таких КЭУ рассматривается от 200 кВт до 10 МВт. При этом в перспективе есть потенциал увеличения мощности для использования в большой энергетике.

В России Институт высокотемпературной электрохимии Уральского отделения РАН (г. Екатеринбург) изготовил под руководством А. С. Липилина, ЭУ на базе ТЭ мощностью 1 кВт, в РФЯЦ – ВНИИТФ (г. Снежинск) создана ЭУ на базе ТЭ мощностью 100 кВт [8].

Контактная информация: 8(347)273-08-44

Работа выполнена при финансовой поддержки Минобрнауки РФ

Автономные стационарные КЭУ на ТЭ, мощностью до нескольких МВт, могут применяться для обеспечения электроэнергией и теплом (горячей водой) отельных поселков, отдаленных районов, ферм, коттеджей, больниц, супермаркетов, для комплексов газовых и нефтяных магистральных трубопроводов, вахтовых бригад, геологических партий, метеостанций и т. д.

В России использование КЭУ на базе ТЭ особо актуально, так как более 60 % территории страны не имеет централизованного энергоснабжения. По всей стране эксплуатируется около 50 тыс. дизельных и бензиновых ЭУ с суммарной мощностью около 5 ГВт, ежегодно потребляющих более 5 млн т условного топлива (более $1,51 \cdot 10^7$ МДж). Средний КПД таких ЭУ ниже 30 %, а их замена на КЭУ – это экономия 2,5 млн т условного топлива в год.

Существуют основные три схемы КЭУ с использованием ГТД и ТЭ [7, 8]:

- схема КЭУ, в которой ТЭ замещает камеру сгорания ГТУ;
- КЭУ на основе ГТУ и ТЭ с внутренней конверсией природного газа, работающая при атмосферном давлении;
- КЭУ на основе ТЭ, работающих на продуктах газификации углей (мощностью до 300 МВт и более).

2. ТОПЛИВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ. ТВЕДОКСИДНЫЕ ТОПЛИВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ (ТОТЭ)

ТЭ – это устройство, в котором химическая энергия топлива (восстановителя) и окислителя, непрерывно и раздельно подводимых к электродам, непосредственно превращается в электрическую энергию [7, 8, 9].

Принцип действия ТЭ состоит в том, что при пропускании кислорода и водорода через пористые трубки, находящиеся в сосуде со щелочным электролитом, происходит соединение атомов водорода с гидроксильным остатком ОН, полученным в результате распада электролита на ионы и остаток ОН. При этом образуется вода, и высвобождаются электроны.

В то же время на положительном электроде происходит соединение кислорода с водой и образование гидроксильного остатка ОН. В качестве отрицательного электрода может служить не только водород, но и любое углеводородное топливо (метан, водяной газ, природный газ, окись углерода и другие). Положительным электродом служат кислород или воздух,

а также сильные окислители. Электроны, накопленные на трубке, являющейся отрицательным электродом, направляются во внешнюю цепь на кислородный положительный электрод, где захватываются кислородом, в результате чего по внешней цепи начинает протекать электрический ток. Кислород непрерывно пополняет в электролите расход ОН, а водород поддерживает необходимое количество воды в электролите.

Простейшая схема ТЭ приведена на рис. 1. Имеются два электрода с электродными камерами, ионный проводник (электролит) между ними. На аноде происходит реакция электроокисления топлива – первая реакция. На катоде протекает электрохимическое восстановление окислителя – вторая реакция. Электроды в ТЭ служат для проведения электрохимических реакций, подвода или отвода электронов. В электролите происходит движение положительно и отрицательно заряженных частиц (ионов). При работе ТЭ анод и катод замыкаются проводником первого рода, по которому электроны двигаются от анода к катоду, совершая работу.

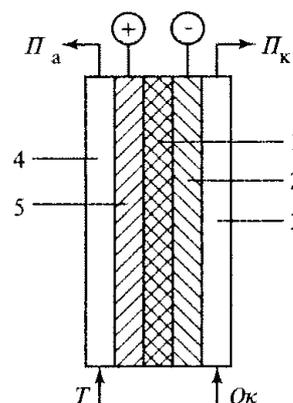


Рис. 1. Упрощенная схема ТЭ [7]:
1 – электролит; 2 – катод; 3 – катодная камера; 4 – анодная камера; 5 – анод; Т – топливо; Ок – окислитель; P_a и P_k – продукты анодных и катодных реакций

Согласно данным [1, 5, 7, 8], существует несколько классификаций ТЭ: по исходным веществам электродных реакций (водород-кислородные, метано-кислородные и др.), по виду преобразования углеводородного топлива (внутренняя и внешняя конверсия); по рабочей температуре (низко-, средне- и высокотемпературные); по типу электролита: щелочные (ЩТЭ), фосфорнокислые (ФКТЭ), протонпроводящие или твердополимерные (ТПТЭ), с расплавленным карбонатным (РКТЭ) и твердооксидные (ТОТЭ).

Наиболее удачной является, по данным [1], классификация по типу электролита, так как она учитывает рабочую температуру ТЭ, ионный характер реакций, а также вид преобразования топлива. В ЩТЭ электролитом служит раствор КОН, рабочая температура 90–200 °С. В ФКТЭ применяется 95–98 % фосфорная кислота, рабочая температура 200 °С. Ионным проводником в ТПТЭ служит протонообменная мембрана, рабочая температура 80–90 °С. Электролитом в РКТЭ являются расплав карбонатов щелочных металлов. РКТЭ работают при температуре 600–700 °С.

В ТОТЭ (по международной классификации SOFC) электрическая проводимость электролитов, обычно на основе оксидов циркония и иттрия, становится приемлемой при температуре выше 1173 К, следовательно рабочая температура ТОТЭ лежит в диапазоне 1173–1273 К. РКТЭ и ТОТЭ также называются высокотемпературными ТЭ (ВТЭ). Основным видом топлива в вышеприведенных ТЭ служит водород, а окислителем – кислород (обычно воздуха).

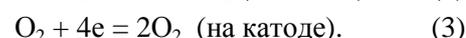
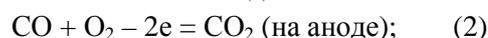
Одним из наиболее перспективных видов ТЭ для применения в КЭУ на базе конвертированных ГТД являются ТОТЭ, так как рабочая температура ТОТЭ и температура продуктов реакции сравнимы с температурами в КС, ТНД, ТВД, СТ. Существует возможность соединения ТОТЭ и ГТД по газовым, топливным (возможность применения одинакового в ТОТЭ и ГТД видов топлива) и воздушным потокам в различные схемы КЭУ. Немаловажным фактором также является максимальная мощность единичного созданного ТЭ того или иного вида, а также плотность мощности, вырабатываемой ТЭ [7, 8].

Кроме этого, ТОТЭ обладают рядом преимуществ:

- использованием неплатиновых катализаторов;
- меньшей чувствительности к каталитическим ядам;
- электроокислением СО;
- относительно низкими электродными поляризациями и соответственно высокими плотностями тока;
- отсутствием проблем затопления и смазываемости электродов;
- отсутствием миграции электролита;
- толерантности к переходным режимам, перегрузкам и недогрузкам;
- высоким КПД;

- экологической безопасности;
- относительной простотой организации потоков газа и обеспечением токосъема;
- при массовом производстве капитальные затраты на них будут соизмеримы с капитальными затратами на тепловые машины и электростанции;
- стоимость генерируемой энергии будет ниже стоимости энергии, вырабатываемой традиционными ЭУ и ТЭС.

При использовании продуктов конверсии углеводородов в основной камере ТОТЭ протекают следующие основные электродвижущие реакции:



Суммарные токообразующие реакции в ТОТЭ:



Главное требование, предъявляемое к электролиту ТОТЭ, – высокая ионная проводимость при относительно низкой беспористости, химической и физической стойкости. Обычно электролитом ТОТЭ служит ZrO_2 , Y_2O_3 .

Электрическая проводимость электролита при температуре 1273 К составляет 0,14 См/см, энергия активации проводимости 63 кДж/моль, коэффициент теплопроводности при 1273 К равен 2,3 Вт/(м • К). Температура плавления электролита равна 2630 К. Падение напряжения в электролите толщиной 40 мм при температуре 1273 К будет составлять 86 мВ при плотности тока 3 кА/м² и 143 мВ при плотности тока 5 кА/м².

Анодом служит материал на основе Ni-ZrO₂ толщиной 0,1–0,2 мм, имеющий малое электрическое сопротивление, высокую стабильность. Толщина несущего анода составляет 0,5–1 мм.

В качестве материала катодов используются оксидные полупроводниковые соединения – манганит лантана или кобальтит лантана, допированные стронцием. Толщина катода обычно 0,15–0,25 мм.

Одна из причин, по которой со стороны энергетики растет интерес к ТОТЭ, – это их параметры. Особенностью является линейный характер (ВАХ) в значительной области температур. С повышением температуры растет электрическая проводимость электролита и полупроводниковых межэлементных соединений

и уменьшается поляризация, что приводит к улучшению ВАХ [7].

Наиболее оптимальной сферой применения ЭУ с ТОТЭ (мощностью свыше 100 кВт) является энергообеспечение вахт и жилых поселков газовых и нефтяных месторождений, отдаленных объектов систем связи, геологоразведки и метеослужбы, а также централизованное энергообеспечение жилых районов и промышленности.

Электрохимический генератор (ЭХГ) – это установка, состоящая из батареи ТЭ, а также систем подвода и распределения топлива и окислителя по ТЭ, а также систем отвода продуктов реакции и теплоты, систем автоматики для регулирования режимов работы ТЭ. Объединенная структура ЭХГ представлена на рис. 2 [7].

Каждая из подсистем ЭХГ достаточно сложная, так как в ЭХГ необходимо поддерживать в определенных пределах расход топлива и окислителя, скорость отвода продуктов реакции, температуру и давление в батарее и других подсистемах, выходное напряжение и т. п. Системы ЭХГ должны выполнять свою роль в стационарном режиме, при переменных нагрузках, запуске и остановке ЭХГ.

Генерируемая в ЭХГ теплота может быть использована в паротурбинной или ГТУ для дополнительного получения электроэнергии или для теплофикации. Инвертор необходим, так как для многих потребителей необходим переменный ток.

Батарея ТЭ должна иметь устройства для ввода топлива и окислителя, вывода продуктов

реакции и отвода теплоты, а также должна быть обеспечена внутренняя непрямая конверсия топлива. Конверторы топлива равномерно распределены между блоками ТЭ для обеспечения более равномерного распределения температуры между элементами [1, 7].

Подвод топлива и окислителя в батареях ТЭ организуется последовательно, параллельно в блоках. Наиболее простой является последовательная подача, но при этом парциальное давление (концентрация) реагентов снижается от первого элемента до элемента на выходе, следовательно, электрические параметры ТЭ и их ресурс ухудшаются по маршруту движения реагентов. Более сложной является параллельная подача реагентов, которая обеспечивает близкие значения парциального давления и параметров. В батареях большой мощности, состоящих из нескольких блоков, реагенты обычно подаются в блоки параллельно, а между блоками – последовательно.

Каждый электрод ТЭ снабжен токоотводом, а электроды, матрицы которых недостаточно электропроводны, имеют токосъемники. В начале развития ТЭ для предотвращения короткого замыкания в них применялись разделители катода и анода. В последние годы в большинстве ТЭ применяются матричные или твердые электролиты, не требующие разделителей. Для обеспечения герметичности батарея или ее отдельные блоки имеют уплотнительные и изолирующие прокладки. Батарея ТЭ или отдельно ее блоки имеет корпус, концевые платы с вводами реагентов (иногда электролита) и вывода продуктов реакции.

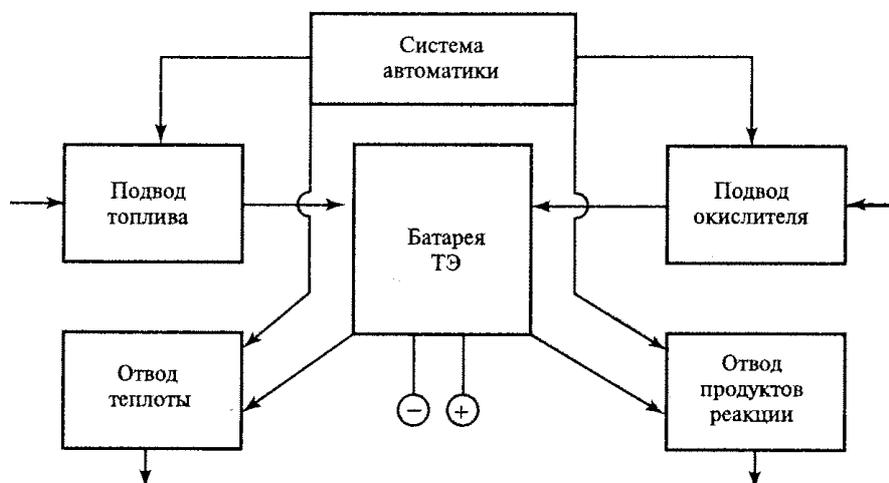


Рис. 2. Структурная схема ЭХГ

Эффективный КПД ЭХГ ниже эффективно-го КПД ТЭ из-за потерь энергии в системе обработки реагентов, потерь энергии в батарее вследствие токов утечки и расходов на собственные нужды ЭХГ.

Эффективные КПД разработанных ЭХГ без реакторов лежат в пределах 0,45–0,65. Для ЭХГ с предварительной переработкой, например конверсией топлива, КПД имеют более низкие значения 0,3–0,45.

Ресурс ЭХГ определяется ресурсом всех систем: батареи ТЭ, систем отвода тепла, переработки и подвода топлива и окислителя и вывода продуктов реакции. Срок службы батарей лежит в пределах 1000–10000 ч [7, 8].

3. АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ ПРОГРАММНЫХ КОМПЛЕКСОВ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ГТД И ЭУ

Для выполнения расчетных исследований повышения эффективности схем КЭУ необходим математический комплекс расчета ТЭ. остро стоит вопрос о создании эффективного, надежного и простого в эксплуатации модуля, способного рассчитывать параметры ТЭ.

В настоящее время наиболее известные математические модели и программные средства моделирования ГТД [3, 4] – это комплексные математические модели ЦИАМ, ГРАД, DVIGwT, GasTurb, GSP, GECAT, Epsilon Professional, United cycle, ОГРА, АСТРА и др. Некоторые программы, например, GasTurb, АСТРА, ОГРА предназначены для моделирования определенных схем ГТД, другие (ГРАД, комплексные ММ ЦИАМ, DVIGwT GSP, Epsilon Professional и др.) являются универсальными и предоставляют большие функциональные возможности, обеспечивают естественную среду для создания и модификации модели.

Известные системы математического моделирования, как правило, имеют гибкий, дружелюбный MS Windows интерфейс, ориентированный на конечного пользователя. Графические и численные результаты могут непосредственно экспортироваться в приложения Microsoft Office (Word, Excel и др.).

В данных программных комплексах отсутствует модуль для расчета ТЭ, что делает невозможным выполнение системных исследований рабочих процессов ТЭ, а также КЭУ на их основе.

В Объединенном институте высоких температур РАН созданы программные продукты инженерного расчета ЭУ открытого цикла на уг-

ледородном топливе. Основным достоинством работы является использование обращения к свойствам среды термодинамической модели рабочего тела, представляющего собой двухфазную многокомпонентную химически реагирующую систему (в общем). На основании этого рассчитывается как термодинамика горения в ОКС, так и реакции через электролит в ТЭ. Данный программный продукт не рассчитывает пароводяную конверсию углеводородного топлива в ТЭ, а также позволяет производить расчет только основной электрохимической реакции, пренебрегая многоступенчатыми превращениями и смешениями, которые происходят внутри ТЭ. Также программа не позволяет производить расчеты сложных схем, в которых участвуют не только ГТУ и ТЭ, но и ряд других энергетических устройств.

Для создания новых и совершенствования имеющихся КЭУ на базе ГТУ и ТОТЭ необходимо проведение огромного количества системных исследований по определению рациональных схем и параметров различных составляющих КЭУ с использованием современных методологий их разработок, направленных на сокращение суммарных затрат и сроков создания, путем широкого применения методов математического моделирования и проектирования и отказа от дорогостоящих испытаний.

Известные системы математического моделирования не позволяют исследовать КЭУ на базе ТОТЭ. Предложенные к настоящему времени математические модели расчета ТЭ, методы и средства моделирования ТОТЭ, а также КЭУ на их основе не решают весь комплекс различных задач структурно-параметрического синтеза и анализа КЭУ на базе ТОТЭ сложных термодинамических циклов.

4. ОПИСАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ТОТЭ И ПРОВЕРКА ЕЕ АДЕКВАТНОСТИ

Анализ особенностей работы ТЭ и систем математического моделирования определяет необходимость разработки алгоритма расчета ТОТЭ, который позволит достаточно точно и оперативно воспроизводить различные схемы и режимы работы КЭУ на базе ГТУ и ТОТЭ с учетом основных значимых факторов, а также позволит осуществлять учет влияния изменения физических свойств рабочего тела на характеристики элементов КЭУ.

Рассмотрим основные процессы, проходящие в твердооксидном топливном элементе (рис. 3). Для системы топливоподготовки разумно использовать пароводяную конверсию (ПВК) углеводородного топлива (метана) в среде водяного пара, в результате которой выделяется водород и монооксид углерода. В анодной полости ТОТЭ на трехфазной границе «твердый электролит-электрод-газ» происходит окисление топлива кислородом воздуха, ионизированном на трехфазной границе с катодом и прошедшем через твердый электролит в виде двухзаряженного иона. Протекают основные электрохимические реакции окисления водорода и СО, в результате которых выделяются водяной пар и СО₂.



Рис. 3. Схема расчета ТОТЭ

Для осуществления пароводяной конверсии необходимо подводить теплоту к стенкам камеры, в которой происходит ПВК.

Математическая модель служит главным образом для определения ЭДС ТЭ, так как ЭДС представляет собой отношение полной работы, совершаемой источником тока при перемещении единичного заряда по электрической цепи к величине этого заряда. В качестве движущей силы перемещения заряда служит сила в виде постоянного потенциала, возникающего при протекании реакции между окислителем и топливом. Энергия химической реакции окисления топлива непосредственно переходит в электрическую и в тепловую энергию. Математическая модель базируется на законах сохранения массы, энергии и уравнениях электрохимических реакций.

Созданный программный модуль SOFC официально зарегистрирован в Российском Агентстве по Патентам и Товарным Знакам (РОСПАТЕНТ), свидетельство № 2009613945 от 24.07.2009. Применение модуля SOFC в системе моделирования DVIGwT [3] позволяет рассчитывать и исследовать КЭУ различных схем на базе ГТД и ТОТЭ.

Оценка работоспособности и адекватности разработанного алгоритма, реализованного в программном модуле SOFC в системе

DVIGwT, выполнена на примерах моделирования ячеек ТОТЭ как планарной конструкции [6], так и трубчатой конструкции в составе электрохимического генератора (ЭХГ) мощностью 1 кВт, описанного в [11].

Отличия в оценках экспериментальных параметров и параметров, полученных расчетом в модуле SOFC, не превышают 3 %. Результаты исследований показывают, что имеет место достаточно хорошая сходимость результатов: максимальное отклонение рассчитанных параметров в величине N_q не превышает $\approx 2,74$ %.

Выполнено моделирование ЭХГ модуля ТОТЭ для макета ЭУ мощностью 1 кВт.

Результаты исследований показывают, что имеет место достаточно хорошая сходимость результатов: максимальное отклонение рассчитанных характеристик параметров ЭХГ не превышает $\approx 3,35$ % в сравнении с экспериментальными данными.

Полученное расхождение экспериментальных и рассчитанных величин объясняется тем, что в программном продукте не удается учесть влияние катализатора на внутренние процессы в ТОТЭ. Естественно, и экспериментальные данные также получены с определенной погрешностью измеренных параметров.

5. РАСЧЕТНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СОЗДАННОГО ПРОГРАММНОГО МОДУЛЯ ТОТЭ

На основе рассмотрения преимуществ авиационных ГТД, в результате которых они могут быть конвертированы в ЭУ различного назначения и на основании необходимости повышения их эффективности, проведены расчетные исследования повышения эффективности ГТЭ-10/95 [2], модернизацией в КЭУ следующих схем:

- КЭУ с ЭХГ на базе ТОТЭ, работающем на отборе воздуха за КНД;
- КЭУ с замененной КС в ГТЭ-10/95 на ЭХГ;
- КЭУ на базе каскада НД ГТЭ-10/95 и ЭХГ на базе ТОТЭ, питающегося воздухом от КНД (0,3 МПа).

Ввиду того, что в ТОТЭ происходит электрохимическая реакция и температура продуктов реакции достаточно высока, рассмотрим способ повышения эффективности ГТЭ-10/95 заменой камеры сгорания на ЭХГ, состоящий из ТОТЭ. Принципиальная схема такой модернизированной КЭУ приведена на рис. 4.

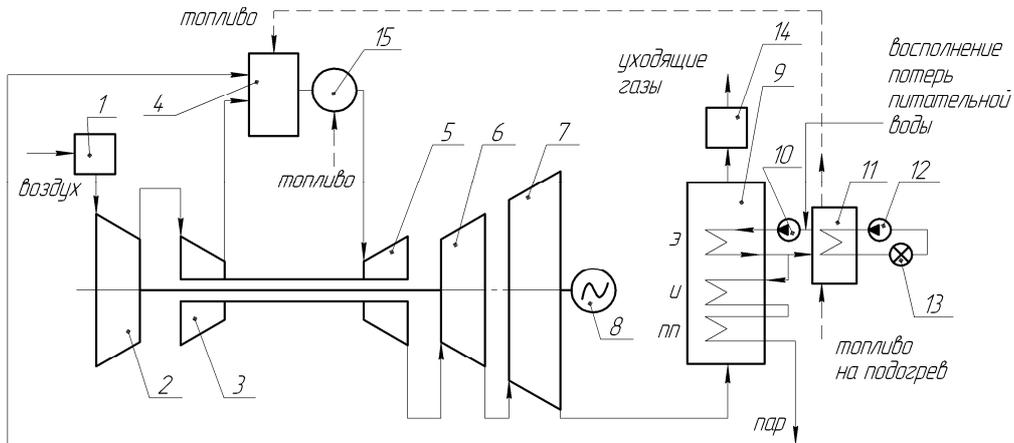


Рис. 4. Принципиальная схема КЭУ на базе ГТЭ-10/95, в которой камера сгорания заменена на ЭХГ на базе ТОТЭ (схема № 2): 1 – комплексное воздухоочистительное устройство (КВОУ); 2 – КНД; 3 – КВД; 4 – ЭХГ; 5 – ТВД; 6 – ТНД; 7 – СТ; 8 – электрогенератор; 9 – КУ; 10 – насос питательной воды; 11 – бойлер; 12 – насос сетевой воды; 13 – потребитель тепловой энергии; 14 – выхлопное устройство; 15 – камера дожигания; э – экономайзер; и – испаритель; пп – пароперегреватель

Топливо подается только в ЭХГ. Температуру продуктов реакции ЭХГ, которая частично понижена за счет подогрева входящих в ЭХГ воздуха и топлива, необходимо повысить до температуры газов на выходе из камеры сгорания в ГТЭ на расчетном режиме. Суммарные затраты топлива в ЭХГ и камере дожигания позволяют существенно повысить мощность всей КЭУ. На основании принципиальной схемы разработана математическая модель, структурная схема которой приведена на рис. 5.

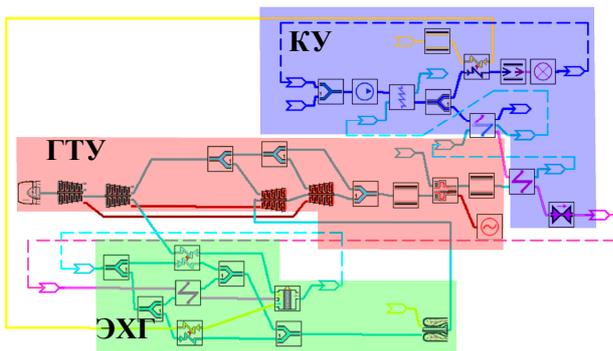


Рис. 5. Структурная схема модели КЭУ с ГТЭ-10/95 с замененной камерой сгорания на ЭХГ на базе ТОТЭ

Структурная схема модели состоит из газотурбинного привода, модернизированного ЭХГ на базе ТОТЭ, элементов системы генерации водяного пара: котла – утилизатора, состоящего из экономайзера, испарителя, пароперегревателя

и др. Устанавливаются рекурсивные связи, обеспечивающие передачу параметров от последующих к предыдущим элементам структурной схемы, показанные пунктирными линиями.

Расходы воздуха, топлива и пара, направляемые в ЭХГ, были смоделированы по расходу воздуха в ГТЭ-10/95 на базе работ [7, 12]. Таким же образом путем аналогии по расходу воздуха в ГТУ подобрано количество параллельно и последовательно соединенных ячеек ТОТЭ.

Температура ПВК и температура основной реакции в ЭХГ равны [1, 7, 12] и поддерживаются за счет камеры дожигания. Значения данных параметров взяты с учетом соответствующих значений из работы [12], а также рекомендаций [1, 7] по ТОТЭ. Поддерживаемые в процессе расчета схемы температурных напоров на холодных концах различных теплообменных аппаратов выбраны по рекомендациям [12].

7. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ГТЭ-10/95 ПРИ РАБОТЕ В СОСТАВЕ КЭУ С ЗАМЕНЕННОЙ КС НА ЭХГ ИЗ ТОТЭ НА НОМИНАЛЬНОМ РЕЖИМЕ

Для удобства анализа результаты расчетов базовой ГТЭ-10/95 и КЭУ на базе ГТЭ и ЭХГ из ТОТЭ (далее по тексту схема 1) на номинальном режиме приведены в табл. 1.

Таблица 1
**Результаты расчета в системе DVIGwT
 базовой ГТЭ-10/95 и схемы 1**

Параметр	ГТЭ-10/95	Схема 1
N , кВт	8000	8000
$n_{\text{КНД}}$, об/мин	9636,25	9621,64
$n_{\text{КВД}}$, об/мин	10385,70	10350,70
$G_{\text{в}}$, кг/с	55,27	54,98
$p_{\text{КНД}}^*$, кПа	280,7	280,8
$T_{\text{КНД}}^*$, К	403,35	403,37
$T_{\text{КВД}}^*$, К	550,95	550,59
$p_{\text{КС}}^*$, кПа	660,3	<u>659,8</u>
$T_{\text{КС}}^*$, К	1116,45	<u>1060,62</u>
$G_{\text{т}}$, кг/с	0,718	<u>0,390</u>
$\alpha_{\text{КС}}$	4,361	<u>2,289</u>
$T_{\text{ТВД}}^*$, К	969,20	924,56
$G_{\text{ТНД}}$, кг/с	55,07	56,40
$T_{\text{ТНД}}^*$, К	866,18	827,98
$p_{\text{СТ}}^*$, кПа	105,3	105,3
$T_{\text{СТ}}^*$, К	733,05	702,37
$N_{\text{ЭХГ}}^*$, кВт	–	12630,4
$n_{\text{ЭХГ}}$, Вт/м ²	–	870,15
$i_{\text{ЭХГ}}$, А/м ²	–	2088,46
$T_{\text{осн р}}$, К	–	1293,02
$T_{\text{ПВК}}^*$, К	–	1293,15
I , А	–	2631,46
U , В	–	0,417
$G_{\text{т ЭХГ}}$, кг/с	–	0,971
Q , кВт	21433,2	17522,0
$N_{\Sigma \text{ КЭУ}}$, кВт	8000	20630,4
η , %**	22,63	30,82

– подчеркнутые параметры даны для камеры дожигания, так как камера сгорания в схеме отсутствует.

** - параметр рассчитан по отношению электрической мощности к теплоте сжигания топлива.

Схема с замененной камерой сгорания на ЭХГ в ГТЭ-10/95 требует значительных переделок, однако экономический эффект от такого вложения компенсируется повышением электрической суммарной мощности КЭУ до 20630,4 кВт (в 2,56 раза больше мощности базовой ГТЭ) и повышением КПД по выработке электроэнергии до 30,82 % (на 8,19 % абсолютных по отношению к базовой ГТЭ).

8. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА ДРОСРЕЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК РАССМАТРИВАЕМЫХ ЭУ

ТОТЭ и ЭХГ на их основе сложно поддаются регулировке, так как работают в основном на изобарно-изотермическом режиме. Изменяемые параметры ГТУ при дросселировании КЭУ

с ЭХГ непосредственно влияют на протекание основной химической реакции внутри ТОТЭ [1]. В ТЭ параметры воздуха для окисления и пара для ПВК, изменяются на переменных режимах работы ГТУ в составе КЭУ.

По результатам расчетов построены дроссельные характеристики исходной ГТЭ, и схемы КЭУ (при условии обеспечения регулирования ЭХГ в составе ГТУ).

Проанализированы зависимости расхода топлива, электрической мощности, η , расхода воздуха на входе в КНД, приведенной частоты вращения КВД, вырабатываемой теплоты потребителю, $\pi_{\text{КНД}}^*$, $\pi_{\text{КВД}}^*$, температуры и давления воздуха на выходе из КВД, температуры газов на выходе из основной камеры или камеры дожигания, температуры и давления газов на выходе из СТ, плотности тока ЭХГ, плотности мощности, температуры газов на выходе из ЭХГ от приведенной частота вращения ротора КНД ($n_{\text{пр КНД}}$). Для приведенных схем ЭУ параметры получены в диапазоне приведенных частот вращения ротора КНД, соответствующих мощности от 8 до 2 МВт. Суммарная электрическая мощность базовой ГТУ и схемы 1 с падением $n_{\text{пр КНД}}$ уменьшается (рис. 6).

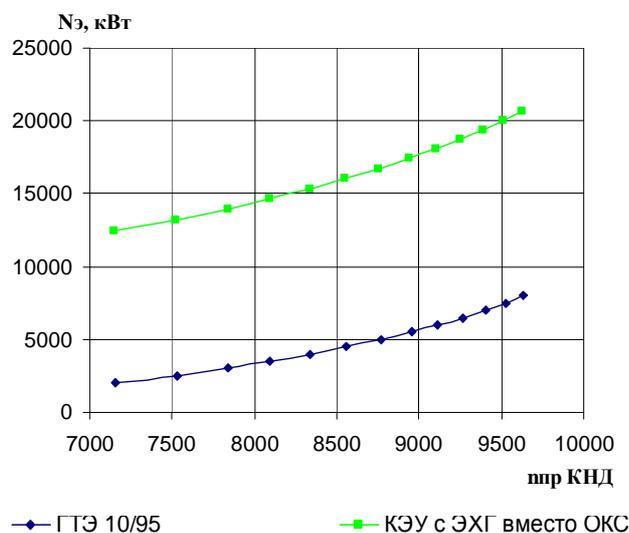


Рис. 6. Зависимость общей электрической мощности ЭУ от $n_{\text{пр КНД}}$

При $n_{\text{пр КНД}} = 9627$ об/мин мощность базовой ГТЭ равна 8000 кВт, в схеме 1 электрическая мощность возросла в 2,58 раза по сравнению с мощностью базовой ГТЭ. Такое резкое увеличение в схеме 2 объясняется более высокими термодинамическими параметрами входных потоков веществ в ЭХГ, что повлекло за собой резкое увеличение мощности ЭХГ и, следовательно, КЭУ в целом.

С уменьшением $n_{пр\ КНД}$ суммарные расходы топлива для камеры сгорания в базовой ГТЭ для камеры дожигания в схеме 1 уменьшаются. При $n_{пр\ КНД} = 9627$ об/мин, соответствующем номинальному режиму работы базовой ГТЭ, расход топлива в базовой схеме равен 0,718 кг/с, в схеме 1 – на 52,8 % больше расхода базовой схемы и составляет 1,36 кг/с.

Анализ изменения электрического КПД рассматриваемых ЭУ (рис. 7) показывает, что при снижении $n_{пр\ КНД}$ в базовой ГТЭ – η_e уменьшается, а в схеме 1 – η_e возрастает и при $n_{пр\ КНД} \approx 7100$ об/мин достигает 35 %, в то время как у базовой ГТЭ – $\eta_e = 12$ %.

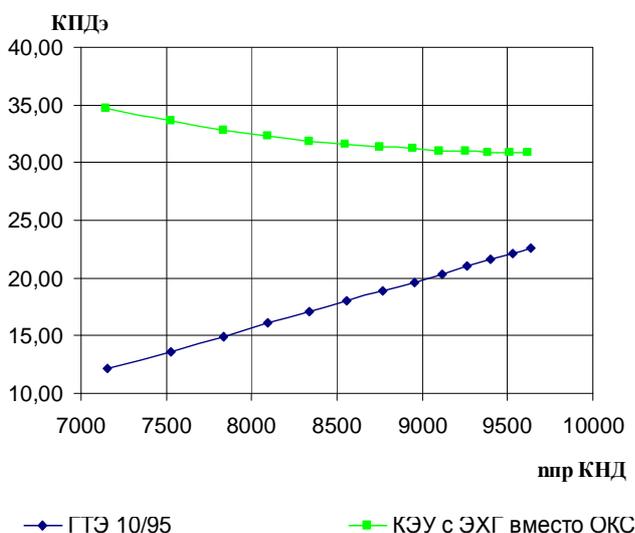


Рис. 7. Зависимость КПДэ ЭУ от $n_{пр\ КНД}$

Объясняется это тем, что в схеме 1 электрическая мощность снижается не так интенсивно, как уменьшается суммарный расход топлива на КЭУ при дроссельных режимах. Повышение электрического КПД с уменьшением $n_{пр\ КНД}$ есть следствие распределения электрической мощности между ГТЭ и ЭХГ с учетом того, что ЭХГ работает практически на стационарном режиме.

Расход воздуха во входное устройство уменьшается со снижением $n_{пр\ КНД}$ во всех рассматриваемых схемах ЭУ. Приведенная частота вращения КВД ($n_{пр\ КВД}$) при уменьшении $n_{пр\ КНД}$ снижается как для базовой ГТЭ, так и для схемы 1. Особенностью является наличие максимума при $n_{пр\ КНД} = 8300$ об/мин.

Для рассматриваемых ЭУ переданная потребителю теплота $Q_{пот}$ снижается с уменьшением $n_{пр\ КНД}$ (рис. 8). При значении $n_{пр\ КНД} = 7100$ об/мин в базовой ГТЭ $Q_{пот} = 11000$ кВт, в схеме 1 – 9300 кВт.

Разница между значениями теплоты в исследуемых ЭУ во всем диапазоне $n_{пр\ КНД}$ сохра-

няется. Объясняется это тем, что в схеме 1 большая часть теплоты уходящих газов расходуется на генерацию пара для ПВК, а в базовой ГТЭ – на нужды потребителя.

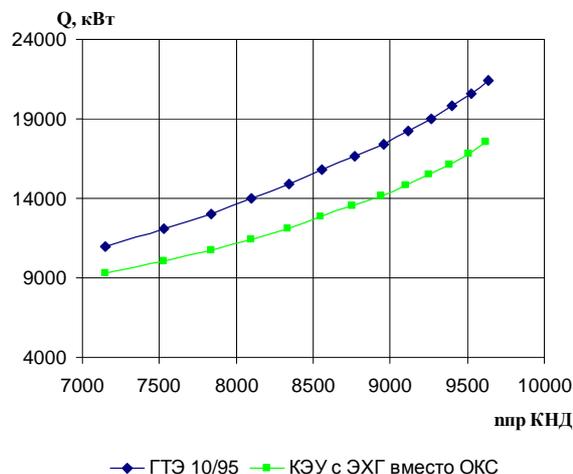


Рис. 8. Зависимость производимой теплоты от $n_{пр\ КНД}$

Уменьшение $\pi^*_{КНД}$ для исследуемых ЭУ происходит с понижением $n_{пр\ КНД}$. Значения $\pi^*_{КНД}$ для схемы № 2 и базовой совпадают во всем исследуемом диапазоне $n_{пр\ КНД}$.

Зависимости изменения $\pi^*_{КВД}$ для двух ЭУ имеют прямопропорциональную зависимость от $n_{пр\ КНД}$. Кривая зависимости $\pi_{КВД}$ для схемы 1 пересекает кривую зависимости $\pi^*_{КВД}$ для базовой ГТЭ при $n_{пр\ КНД} = 9700$ об/мин.

Рассмотрим зависимость температуры продуктов сгорания на выходе из камеры сгорания (для базовой схемы ГТЭ) и для камеры дожигания схемы 1 от $n_{пр\ КНД}$. В КЭУ исследуемая температура несколько ниже базовой, так как камера дожигания установлена для обеспечения поддержания пропускной способности ТВД. Параметры продуктов сгорания за СТ необходимы для подбора режимов работы котла-утилизатора. Давления за СТ для исследуемых схем равны, что было учтено при проведении расчетов. В исследуемых ЭУ значения температуры газов за СТ ($T^*_{СТ}$) уменьшаются с уменьшением $n_{пр\ КНД}$. Значения исследуемой температуры схемы 1 ниже значений базовой ГТЭ и достигают при $n_{пр\ КНД} = 9600$ об/мин для схемы 1 – 700 К, для базовой ГТЭ 733 К. При рассмотрении характеристик ЭХГ на дроссельных режимах в составе КЭУ необходимо отметить тенденцию уменьшения плотности тока и плотности мощности (рис. 9, 10) с уменьшением приведенной частоты вращения КНД.

Температура на выходе из ЭХГ (рис. 11) в КЭУ практически не изменяется (порядка 1500...1520 К) с уменьшением $n_{\text{пр КНД}}$.

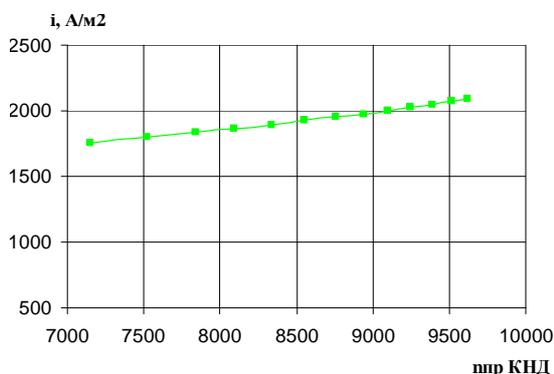


Рис. 9. Зависимость плотности тока ЭХГ от $n_{\text{пр КНД}}$ (схема 1)

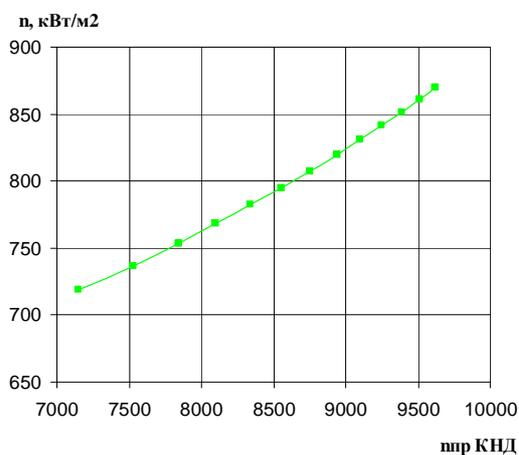


Рис. 10. Зависимость плотности мощности ЭХГ от $n_{\text{пр КНД}}$ (схема 1)

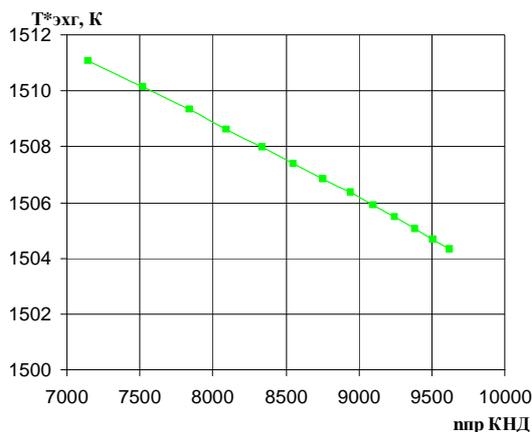


Рис. 11. Зависимость температуры газов на выходе из ЭХГ от $n_{\text{пр КНД}}$ (схема 1)

ВЫВОДЫ

Разработана и реализована на ЭВМ математическая модель функционального твердооксидного топливного элемента SOFC, учитывающая внутренние электрохимические реакции, проходящие в ТОТЭ.

Поверочные расчеты ТОТЭ показывают, что предложенная математическая модель с достаточной для инженерных расчетов точностью позволяет определять параметры ТО-ТЭ на различных режимах работы в модуле SOFC системы математического моделирования DVIGwT.

Согласованность результатов расчетных исследований ТОТЭ с экспериментальными данными подтверждает адекватность описания рабочих процессов и применимость разработанной математической модели SOFC.

Из рассмотренных в работе схем, выбрана и разработана схема модернизации ГТЭ-10/95 – созданием КЭУ с замененной камерой сгорания на ЭХГ в ГТЭ-10/95.

КЭУ с замененной камерой сгорания на ЭХГ в ГТЭ-10/95 требует значительных переделок базовой ГТЭ, но при этом достигается повышение электрической суммарной мощности КЭУ до 20630,4 кВт при КПД по выработке электроэнергии 30,82 % на номинальном режиме.

Анализ дроссельных характеристик показывает, что со снижением приведенной частоты вращения КНД в базовой ГТЭ η_e уменьшается, а в КЭУ η_e возрастает и при $n_{\text{пр КНД}} \approx 7100$ об/мин достигает 35 %.

Электрическая мощность в КЭУ падает при снижении приведенной частоты вращения КНД с 9621 до 7146, при этом мощность всей ЭУ уменьшается с 20630 до 12436 кВт (на 39,72 % от номинала), в то время как в базовой схеме при таком же диапазоне изменения приведенной частоты вращения КНД снижается электрическая мощность с 8000 до 2000 кВт (75 % от номинала).

Результаты моделирования КЭУ на базе ГТД и ТОТЭ, приведенные на примере ГТЭ-10/95 и КЭУ с замененной камерой сгорания на ЭХГ из ТОТЭ при различных схемах совмещения, подтверждают функциональные возможности разработанного авторами программного комплекса. Он может служить основой для создания новых схем КЭУ, выполнять многовариантные предпроектные расчеты, включая расчеты их характеристик, тем самым сокращая сроки и затраты на их разработку.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Борисов В. Н., Лукашенко И. Г., Ахлюстин М. А.** Введение в термодинамику топливного элемента // Твердооксидные топливные элементы: Сб. науч.-техн. ст. Снежинск: Изд-во РФЯЦ – ВНИИТФ, 2003. С. 9–15.

2. Газотурбинная энергоустановка ГТЭ-10/953-002. Руководство по эксплуатации и техническому обслуживанию. ГТП 953.00.0.0000РЭ. Уфа: ФГУП НПП «Мотор», 2004. 458 с.

3. **Горюнов И. М.** Структурно-параметрический синтез и анализ авиационных ГТД и энергетических установок на их основе: дисс. на соиск. уч. ст. д-ра техн. наук. Уфа: УГАТУ, 2007. 330 с.

4. **Горюнов И. М.** Термогазодинамические расчеты ГТД и теплоэнергетических установок с использованием системы DVIgWT // Вестник УГАТУ. 2006. Т. 7, № 1 (14). С. 61–70.

5. **Захаренков Е. А.** Исследование и оптимизация схем и параметров гибридных электростанций на основе топливных элементов и газотурбинных установок: Автореф. на соиск. уч. ст. канд. техн. наук. М.: МЭИ (ТУ), 2009. 20 с.

6. **Белов Д. В., Устюгов А. В., Чухарев В. Ф.** Исследование электрических характеристик планарного твердооксидного топливного элемента // Твердооксидные топливные элементы: Сб. науч.-техн. ст. Снежинск: Изд-во РФЯЦ-ВНИИТФ, 2003. С. 334–339.

7. **Коровин Н. В.** Топливные элементы и электрохимические энергоустановки. М.: Издательство МЭИ, 2005. 280 с.

8. **Липилин А. С.** Состояние и будущее индивидуальной энергетики // Альтернативная энергетика и экология. 2009. № 9(77). С. 139–152.

9. **Лоскутников А. А., Бакиров Ф. Г., Горюнов И. М.** Разработка модуля термодинамического расчета твердооксидных топливных элементов SOFC // Вестник УГАТУ.

10. **Цанев С. В., Буров В. Д., Ремезов А. Н.** Газотурбинные и парогазовые установки тепловых электростанций: Учеб. пособие для вузов. М.: Изд-во МЭИ, 2002. 584 с.

11. Электрохимический модуль твердооксидного топливного элемента для макета энергоустановки мощностью 1 кВт / В. Ф. Чухарев [и др.] // Твердооксидные топливные элементы: Сб. науч.-техн. ст. Снежинск: Изд-во РФЯЦ-ВНИИТФ, 2003. С. 352–357.

12. High Efficiency SOFC / ATS – Gas Turbine Power System. Final report. Nat. Energy Tech. Laboratory. Siemens Westinghouse Power Corp, 2001. 180 p.

ОБ АВТОРАХ

Лоскутников Александр Александрович, ст. преп. каф. авиац. теплотехники и теплоэнергетики. Дипл. инженер-теплоэнергетик (УГАТУ, 2005). Канд. техн. наук по КЭУ на базе АГТД и топливных элементов (УГАТУ, 2010). Иссл. в обл. топливных элементов и КЭУ на их основе, разработки и анализе матем. моделей сложн. схем КЭУ с ТЭ.

Горюнов Иван Михайлович, проф. каф. авиац. двигателей, зав. НИЛ САПР-Д. Дипл. инженер-механик (УАИ, 1974). Д-р техн. наук по тепл. двигателям летательн. аппаратов (УГАТУ, 2007). Иссл. в обл. автоматизации проектирования, доводки, изготовления и эксплуатации ГТД и ЭУ.

Бакиров Федор Гайфуллович, проф., зав. каф. авиац. теплотехники и теплоэнергетики. Дипл. инженер-механик (УАИ, 1969). Д-р техн. наук по тепл. двигателям летательн. аппаратов (УГАТУ, 1995). Иссл. в обл. авиадвигателестроения, тепловых двигателей и энергоустановок, проблем энергосбережения.