

АЗЕРБАЙДЖАНСКАЯ РЕСПУБЛИКА

На правах рукописи

**ПОВЫШЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ РАБОТОСПОСОБНОСТИ
И КАЧЕСТВА ТОПЛИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ
ПЛАНАРНОГО ИСПОЛНЕНИЯ**

Специальность: 2004.01 – “Динамика, прочность машин, при
боров и аппаратов”

Отрасль науки: Технические науки

Соискатель: **Саида Ариф гызы Мусави**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой
степени доктора философии

Баку – 2022

Диссертационная работа выполнена в Научно-исследовательском институте "Геотехнологические проблемы нефти, газа и химия" при Азербайджанском Государственном Университете Нефти и Промышленности

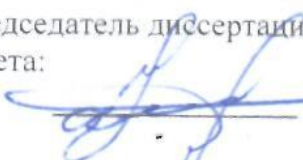
Научный руководитель: Доктор технических наук, профессор
Рамиз Алиш оглы Гасанов

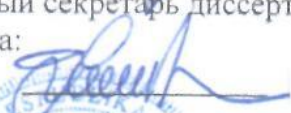
Официальные оппоненты: Доктор технических наук, профессор
Фуад Фазиль оглы Гасанов


Кандидат технических наук, доцент
Рафиг Байрам оглы Арабов

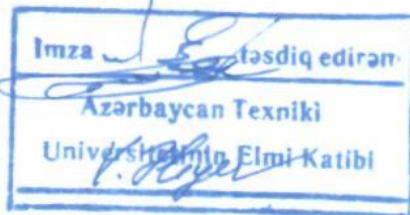
Кандидат технических наук, доцент
Агакиши Фарадж оглы Мамедов

Диссертационный совет ED 2.09 Высшей Аттестационной Комиссии при Президенте Азербайджанской Республики, действующий на базе Азербайджанского Технического Университета

Председатель диссертационного совета: Доктор технических наук, профессор

Алекпер Гюльяхмед оглы Гусейнов

Ученый секретарь диссертационного совета: Кандидат технических наук, доцент

Физули Расул оглы Расулов

Председатель научного семинара: Доктор технических наук, профессор

Аскер Габиб оглы Тагызале



ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность и степень разработанности темы. Рост общей численности населения в мире привел к огромному потреблению различных энергетических ресурсов. Сложившаяся ситуация с развитием населения заставила ученых проявлять повышенный интерес к разработке новых энергетических ресурсов. За счет улучшения используемых ресурсов может быть достигнуто преимущество в сравнении с ископаемым топливом и преодолены связанные с этим проблемы.

Кроме того, в настоящее время предъявляются повышенные требования к экологическим проблемам из-за глобального потепления на земле. Следовательно, мировая общественность, включая и ученых, должны нести ответственность за поиск надежного решения для сокращения использования ископаемого топлива, что поможет противостоять проблемам исчерпания ресурсов в будущем. Тем самым, предлагая альтернативные варианты использования ресурсов можно добиться указанной цели с учетом безопасных и эффективных решений. Поэтому, на современном этапе технического прогресса, использование топливных элементов очень быстро увеличилось и нашло применение в различных отраслях промышленности и быта. Согласно современному уровню развития топливные элементы (FC) могут обеспечить экологически чистое, эффективное и надежное производство энергии практически для любого электрического силового устройства. Кроме того, планируется широкое использование топливных элементов в портативных, стационарных и транспортных приложениях.

Предлагая новые и эффективные решения, которые могут участвовать в преодолении текущих серьезных проблем, особенно для твердооксидных топливных элементов (ТОТЭ) (электроды и межкомпонентные соединения) должны быть активно исследованы и разработаны, чтобы соответствовать промышленным и общественным потребностям. Кроме того, для устройств ТОТЭ проводились исследования по определению технических характеристик и их материальному обеспечению с целью оптимизации технологических показателей и решения

задач обеспечения эффективности использования в различных приложениях. За счет разработки недорогих, легко спекаемых материалов (Ni, Fe, Cu, Al, Sr); и путем разработки твердотельного керамического анода или катода для приложений ТОТЭ в различных масштабах (от макро до наномасштаба), удалось достичь существующий уровень коммерциализации ТОТЭ в различных областях техники. Надо отметить, что технологии производства электроэнергии с применением твердооксидных топливных элементов отвечают всем требованиям, т.е. могут использовать различные топливные ресурсы (имеют flexibility), влияние на окружающую среду сведено к минимуму (имеют Compatibility), проектируются с учетом коммерческой привлекательности (Affordability), имеют широкий спектр практического применения (Adoptability), способны работать как для производства электроэнергии, так и химического производства (Capability).

Для решения этих проблем, то есть для повышения уровня коммерциализации, существующих ТОТЭ необходимым условием является проведение комплекса механических исследований с соответствующими результатами, составляющих совместимость с результатами других проблем их развития.

В настоящей диссертации рассмотрены ТОТЭ в планарном исполнении и их развитие в последние десятилетия, а также значение для производства экологически чистой энергии.

Объект и предмет исследования. Объектом исследования является один из типов разработок ТОТЭ, нашедших применение в различных областях техники, а именно топливных элементов в планарном исполнении. Предметом исследования являются показатели работоспособности и качества топливных элементов планарного исполнения, путем решения механических проблем их компонентного состава для приведения их в совместимость с результатами решения других проблем разработки ТОТЭ.

Цель и задачи исследования. Целью исследования является разработка методологии проектирования высокотемпературных твердооксидных топливных элементов плоского слои-

стого макрокомпозиционного исполнения для повышения их показателей работоспособности и качества.

Задачей исследования является разработка, исследование и проектирование моделей твердотельной слоистой макрокомпозиционной конструкции с различными физическим, реологическим и структурно-механическим свойствами материального исполнения.

Методы исследования. Конструктивное и физическое моделирование, математическое моделирование и решение краевых задач, методы оптимизации, разработка проведения и обобщения экспериментальных исследований.

Основные положения, выносящиеся на защиту.

1. Обоснование и постановка механических проблем высокотемпературных слоистых конструкций твердооксидных топливных элементов (с различным конструктивно-материальным исполнением) с учетом операционных показателей условий эксплуатации.

2. Оценка влияния изменений реофизических и структурно-механических свойств материального обеспечения на свойства работоспособности конструктивного исполнения как отдельных топливных элементов, как в одиночном, так и в стачковом исполнениях.

3. Изучение для определения сущности влияния феномена “формы конструктивного исполнения” на несущую способность как отдельных твердооксидных топливных элементов, так и в стачках.

4. Разработка критериев для оценки показателей качества твердооксидных топливных элементов, работающих при высоких операционных температурах и скачкообразных режимах эксплуатации.

5. Определение срока живучести высокотемпературных топливных элементов с различным материальным исполнением и моделями деформационного поведения.

Научная новизна исследования. Моделирование и исследование напряженно-деформированного состояния и обеспечение эффективности многослойной конструкции отдельных

твердооксидных топливных элементов и их стиков, с учетом феноменов, определяющие их конструктивно-материальное исполнение и условия эксплуатации.

Теоретическая и практическая значимость исследования.

1. Определен и обоснован круг механических проблем конструкций топливных элементов макрокомпозитного исполнения для условий операционных температур и режимов их эксплуатации.

2. Разработана методика для определения формы, порядка и параметров ядер ползучести и релаксации для оценки деформационного поведения конструкций макрокомпозитов с различным материальным исполнением в условиях операционных температур при различных режимах эксплуатации.

3. Разработаны методика расчета на длительную прочность и устойчивость конструкций отдельных топливных элементов планарного исполнения и их стиков, работающих при высоких операционных температурах с учетом режимов эксплуатации.

4. Результаты, полученные в диссертационной работе, позволяют выполнять проектно-конструкторские работы для создания ТОТЕ с различными эксплуатационными характеристиками и решать задачи коммерциализации для их применения в различных отраслях промышленности.

5. Предложения по результатам включены в проекты, посвященные разработке и внедрению низко (SFP № G5366 (09.02.2017)), средне (SFP № G5949 (01.03.2022)) и высоко (EAP SFP 984580, SFP 987898) температурных топливных элементов и профинансированные НАТО в рамках программы “Наука ради мира и безопасности” и доложены на сессии Института Современных Исследований (ASI- Advanced Science Institute) НАТО.

Апробация и внедрение: Результаты диссертационной работы представлены на:

- XVI научной конференции докторантов и молодых исследователей (Баку, 2012);

- XVII научной конференции докторантов и молодых исследователей (Баку, 2013);

- Научно-практической конференции “Азербайджан-2020: Перспективы развития нефтегазовой промышленности”, посвященный 90-летию Г. Алиева (Баку, 2013);
- XV международной молодежной научной конференции “Севергеоэкотех-2014” (Ухта, 2014);
- Международной научной конференции, посвященной научно-технической и прикладной проблемам современной энергетики (Сумгаит, 2015);
- XX Республиканской научной конференции докторантов и молодых специалистов, посвященной году Мультикультурализма в Азербайджане (Баку, 2016);
- XXV Международной научно-практической конференции (Пенза, 2019);
- XXVI Международный научный симпозиум: “Шуша: Триумф Победы” (Эскишехир/Турция, 2022 г.);
- Научных семинарах кафедры “Механика” АГУНП и НИИ “Геотехнологические проблемы нефти, газа и химия (2016-2017).

По теме диссертационной работы опубликовано 19 научных трудов.

Название организации, в которой выполнена диссертация. НИИ “Геотехнологические проблемы нефти, газа и химия” при Азербайджанском Государственном Университете Нефти и Промышленности.

Общий объем диссертации в символах с указанием объемов каждого структурных элементов диссертации по отдельности. Диссертация состоит из введения, 4-х глав, 156 страниц компьютерного текста, содержит 28 рисунков, 16 графиков, 8 таблиц и список из 99 наименований литературы. Титульный лист и оглавление (2951 символов), введение (8295 символов), I глава (76355 символов), II глава (29537 символов), III глава (64288 символов), IV глава (14168 символов), выводы (3050 символов) и список используемой литературы (18946 символов). Объем диссертации составляет 198640 знаков, не считая рисунков, таблиц, графиков и списка литературы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении анализируются существующие конструктивные исполнения топливных элементов на опыте разработок различных европейских и азиатских стран. Изучение принципа их работы, а также происходящих в них кинетических процессов подтверждают тот факт, что указанные показатели зависят от множества факторов физико-химической природы, активизируемые в интервале температур (600-1200)⁰С.

Утверждается, что прогнозные модели для определения показателей работоспособности и качества должны строиться на основе исследований моделей твердотельной слоистой макрокомпозитной конструкции с различными физическим, реологическим и структурно-механическим свойствами ее элементов.

Комбинация этих свойств определяет деформационную модель и механизмы разрушения макрокомпозитной конструкции ТОТЭ и материалов их изготовления.

А разрушения различной природы, проявляемые в виде расслоения, потери устойчивости, растрескивания, накопления повреждений на стадии изготовления и т.д., и снижающие показатели работоспособности и качества ТОТЭ определяется формой конструктивного исполнения и является следствием их нагружения операционными нагрузками за период эксплуатации.

Показано, что если многие электрохимические и материаловедческие вопросы разработки и эксплуатации SOFC для существующих конструктивных их исполнений нашли решения, то вопросы механического поведения при генерируемых высоких температурах как отдельных слоев, представляемых твердотельными композитами с различным деформационным поведением элементов, так и их использования в stack, а stack в assembly, требуют уточнения.

Первая глава диссертационной работы посвящена обзору топливных элементов и оценки перспектив их применения как альтернативных источников электрогенерирования, а также постановки задач.

В этой главе топливные элементы хронологически анализируются как в конструктивном исполнении, а также по эффективности, существующим мощностям, областям применения и т.д.

Приводится анализ положительных и отрицательных в сравнении с другими электрогенерирующими объектами свойства топливных элементов и пути их превращения в коммерческие привлекательные объекты [7]¹.

Приводятся следующие модификации ТЭ и уровень их разработанности в различных странах мира для применения в различных областях промышленности.

Далее в этой главе обосновываются задачи, необходимые для исследования и их значимость в обеспечении требуемой эффективности эксплуатации.

Современным электроэнергетическим системам предъявляются ряд требований, определяющих для их применения в перспективе в нефтегазовой и других отраслях промышленности. Эти требования способствуют повышению потребительского качества применяемых систем и предназначены в основном для обеспечения их коммерциализованности (определяет доступность), лояльности к окружающей среде (взаимодействие с окружающей средой), многофункциональности (определяет способность использования в различных компоновках), соответствия условиям местности функционирования (требования местности), готовности и наличия потребляемого топлива по качеству и объемам потребления (гибкость в использовании топлива). Вызвано это тем, что уровень потребления энергоресурсов в мире и, соответственно, отрицательно-вредное влияние реализуемых для этой цели производственных процессов на окружающую среду стремительно растет.

Технологии производства электроэнергии с применением твердооксидных топливных элементов отвечают всем вышеперечисленным требованиям, т.е. могут использовать различные топливные ресурсы, влияние на окружающую среду сведено к минимуму (имеют Compatibility), проектируются с учетом ком-

¹Современные электрохимические генераторы и их топлива. Мусави С.А.

мерческой привлекательности, имеют широкий спектр практического применения, способны работать как для производства электроэнергии, так и химического производства (Capability). Твердооксидные топливные элементы структурно включают в себя нижеследующие элементы.

Превращение энергии исходных топлив (угля, нефти, природного газа) в электричество является многоступенчатым процессом. Действительно, коэффициент использования энергии такого превращения определяется вторым законом термодинамики, чем ограничивается возможность его существенного повышения выше существующего уровня. Коэффициент использования энергии топлива в самых современных паротурбинных энергетических установках не превышает 40%. В топливных элементах непосредственно в электричество превращается от 60 до 70% энергии топлива и КПД на энергетических установках, использующие водород из углеводородного топлива в топливных элементах достигает уровня 40–45%.

Существующие конструктивно-технологические возможности как отдельных, так и в стаках топливных элементов позволяют рекомендовать их для широкого использования в обозримом будущем в качестве источников энергии в различных отраслях экономики. Предполагаемые применения топливных элементов несмотря на высокую их стоимость допускает их использование для различных нужд в объектах исследования околоземного пространства. Например, преимущества топливных элементов в метрических и массовых характеристиках позволили использовать их при пилотируемых аэрокосмических объектах. Лояльность топливных элементов к месторасположению позволяет их также использовать в качестве оборудования для электроснабжения различных отраслей техники и технологиях. В сочетании с электродвигателем постоянного тока топливный элемент будет эффективным источником движущей силы автомобиля. Для широкого применения топливных элементов необходимо проведение исследований по их коммерциализации, включая снижение их стоимости и расширение возможностей эффективного использования дешевого топлива. При выполне-

нии этих условий топливные элементы во всем мире будут способствовать доступному внедрению электрической и механической энергий. Существуют две сферы применения ТЭ: автономная и большая энергетика. Для автономного использования основными для топливных элементов являются удельные характеристики и удобство эксплуатации, а экономичность – решающим фактором для большой энергетики. Кроме того, установки не должны изготавливаться из дорогих материалов и использовать не дорогие технологии подготовки природного топлива и быть долговечными.

Вторая глава диссертационной работы посвящена топливам, используемым в системах топлива топливных элементов, их анализу и определения существующих, а также проблемам создания новых источников ресурсов.

Совершенство механической модели ТЭ, в том числе существенно зависит от вида топлива, подаваемого на анодную поверхность по системе подачи топлива, что ставит задачи определения топлив с низкими коммерческими характеристиками и соответствием необходимых объемов для обеспечения функциональности ТЭ.

Вид подаваемого топлива и структурно–механические свойства материала изготовления анода конструкции ТЭ, определяет интенсивность реакции на его поверхности, ионизации, подаваемого топлива, и в конечном итоге выход плотности и качества электро энергии, а значит эффективность установки.

Кроме того вид подаваемого топлива существенно может влиять также на де градационные процессы, происходящие на поверхности анода, как скачкообразно, так и в процессе эксплуатации и способствующие перерыва в эксплуатационном процессе. Обычно в качестве топлива ТЭ используются водородный газ, газогидраты и ПНГ.

Технологии по утилизации ПНГ используются для переработки газа с нефтяного месторождения и превращать его электричество и тепло. Мини-ТЭС проектируются различной мощности (от 1 до 50 МВт) на базе газотурбинных (ГТУ) и газопоршневых (ГПА) агрегатов, в том числе работающих на по-

путном газе. Целесообразным принято применение ГТУ для больших единиц мощностей (от 3 МВт и выше) и равномерном энергопотреблении, в остальных случаях более целесообразным является применение ГПА. Преобразование в электроэнергию и обеспечение приоритетного доступа на оптовый энергетический рынок мощностей, производимых путем утилизации ПНГ на газотурбинных и газопоршневых электростанциях, использующих в качестве основного топлива ПНГ или продукты его переработки, являются перспективными технологиями со значительным экономическим эффектом [4]².

С учетом большой экономичности и экологической выгоде, а также наличия соответствующих ресурсов для утилизации ПНГ путем компоновки ГТУ или ГПА с электрохимическими генераторами типа ТОТЭ за последнее время разработаны и внедрены электрогенерирующие установки. Это объясняется и тем, что для использования в топливной системе твердооксидных топливных элементов ПНГ является одним из важнейших видов топлив. Процесс генерации различных по значениям тепловых мощностей, определяющие требования, предъявляемые к материалам и свойствам твердых электролитов существенно зависит от физико-химических процессов на анодно-катодных поверхностях ТОТЭ.

Таким образом, попутный газ, выделенный из нефти при эксплуатации нефтяных скважин и направляемый к факельной установке для сжигания используется, как источник обеспечения экологически чистой электроэнергией МСП. Кроме этого появляется возможность использования выделенной горячей воды для бытовых нужд обслуживающего персонала.

С учетом того, что продукты сгорания попутного газа, выделяемого из нефти при эксплуатации нефтяных скважин на МСП интенсивно загрязняет окружающую среду и ПНГ является источником топлива для ТОТЭ гибридных конструкциях с ГТ для утилизации целесообразно:

А) предотвращения загрязнения окружающей среды продуктами сгорания попутного газа;

² К вопросу утилизации попутного нефтяного газа. Мусави С.А.

Б) для выработки электроэнергии горячей воды для использования в производственно бытовых нуждах.

В) горячую воду от использования и сжигания попутного газа в топливных ячейках можно направлять для использования обслуживающим персоналом морской стационарной платформы.

Возможный перечень существующих топлив, их виды и фазовые состояния и источники генерации приводится в таблице.

Таблица
Ресурсы топлив для топливных элементов

Источники происхождения топлив	ФАЗОВЫЕ СОСТОЯНИЯ ТОПЛИВ		
Природные	Газообразные	Жидкие	Твердые
	Природные газ	Газолин	Уголь
	Синтез газ	Дизель	
	Угольный газ	Метанол	
	Водород		
Восстанавливаемые	Биогаз	Этанол	Биомасса
Вторичные			Отходные материалы
		Отходы питательный жиров и масел	Биогенные
			Минералы
			Пластики

Основной акцент делается, с учетом экологичности и возможности достижения этих ресурсов, на попутный нефтяной газ, газовые гидраты и водородное топливо. По всем видам топлива проводится анализ возможностей их утилизации в топливных элементах.

Третья глава посвящена постановке, интерпретации и решению механических проблем твердооксидных топливных элементов и содержит исследования по классификации механических проблем ТОТЭ, для постановки и решения задач прочно-

сти и устойчивости для различного их конструктивного, включая стачное исполнение [9]³.

Отмечается, что ТОТЭ технологий находятся в начальной стадии развития и многие их проблемы, включая и механические, ожидают своего решения. Безусловно, решение этих и других проблем позволят разработать и внедрить коммерчески привлекательные электроэнергетические установки (ЭЭУ) на базе ТОТЭ технологий с требуемой надежностью, большим сроком службы и высокими эксплуатационными характеристиками. Существование же комплекса показателей эффективности ЭЭУ на базе ТОТЭ технологий накладывают определенные требования на процессы их разработки, изготовления и эксплуатации.

Каждое конструктивное воплощение ТОТЭ на всех этапах их изготовления и эксплуатации характерно соответствующими формами исполнения, геометрическими характеристиками, начальными несовершенствами, перманентными режимными нагрузками, интенсивностью и эффективностью электрофизических и электрохимических и т. д процессов, определяемые их конструкцией. Прогнозные модели для определения показателей работоспособности и качества единичного топливного элемента строятся на основе исследований моделей твердотельной слоистой макрокомпозитной конструкции с различными физическими, реологическими и структурно-механическими свойствами ее элементов (наличие двух пористых электрода-анод и катод, а также плотного электролита). Комбинация этих свойств определяет деформационную модель и механизмы разрушения макрокомпозитной конструкции ТОТЭ и материалов их изготовления.

Разрушения различной природы, проявляемые в виде расслоения, потери устойчивости, растрескивания, накопления повреждений на стадии изготовления и т.д., и снижающие показатели качества ТОТЭ определяется формой конструктивного исполнения и является следствием их нагружения в и за период эксплуатации. Следует отметить, что во всех случаях вид нагружения является термомеханическим, действие которого

³ К вопросу решения механических проблем SOFC. Мусави С.А.

определяет деформируемость и как следствие живучесть конструкции электродной системы.

Причем действие термических нагрузок сопровождает весь период функционирования топливного элемента и имеет скачкообразный характер действия в режимах пуска и остановок системы.

Надо отметить, что вопросы механического поведения при генерируемых высоких операционных температурах как отдельных слоев, представляемых твердотельными композитами с различным деформационным поведением элементов, так и их использования в stack, а stack в assembly, требуются в уточнениях [10]⁴.

ТОТЭ, как наиболее практичный и эффективный класс топливных элементов наряду с основными проблемами требует проработки множества механических вопросов их разработки и эксплуатации.

Известно, что любое деформационное поведение характеризуется геометрическими соотношениями вида $u = u(\varepsilon)$, уравнением равновесия (или движения) вида $\sigma = \sigma(u)$ и физическими соотношениями вида $\sigma = \sigma(\varepsilon)$, где σ, u, ε – соответственно напряжение, перемещение и деформация. Оценивается это поведение условием прочности, что связано с существованием поверхности текучести в виде выпуклой поверхности в пространстве напряжений и ее расположением по отношению к пути нагружения.

Причем, если продолжение пути нагружения приводит к новым деформациям, то процесс называется активным нагружением, в противном случае – разгрузкой. Линия активного нагружения и ее расположение по отношению к поверхности текучести классифицирует вид деформаций.

Анализ существующих исследований показывает, что механические модели, изучаемые в различных схемах и режимах нагружений должны закладываться как механические (модуль

⁴ Термомеханическая устойчивость твёрдооксидных топливных элементов (SOFC) планарного исполнения. Гасанов Р.А., Гульгазли А.С., Мусави С.А.

Юнга $-E$, коэффициент Пуассона $-\mu$, предел пропорциональности $-\sigma_{np}$ предел текучести $-\sigma_T$, предел прочности $-\sigma_n$), так и реологические (константы, входящие в ядра ползучести и релаксации), свойства, функции $\sigma_{np} = \sigma_{np}(\theta)$, $\sigma_T = \sigma_T(t)$, $\sigma_n = \sigma_n(t)$ определяемые по экспериментальным исследованиям (механические свойства могут определяться и по литературным исследованиям).

Сложность моделирования деформационного поведения макрокомпонитных конструкций типа топливных элементов способствовала разработке теории для адекватного моделирования деформационного поведения ТЭ и условий прочности для оценки показателей работоспособности и качества их конструкций, что позволило решить проблемы проектирования совместимых сочетаний параметров конструкций, их материального и режимного обеспечения в пределах задаваемых показателей качества с учетом определенных феноменов конструкций ТОТЭ (рисунок 1).

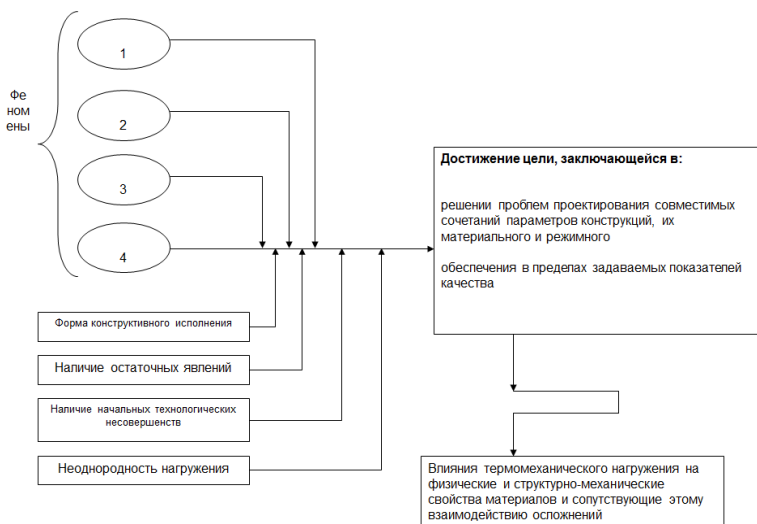


Рисунок 1. Механические проблемы ТОТЭ и методика их решения

Далее в этой главе поставлены и решены задачи для топливных элементов, имеющие плоскообразное конструктивное исполнение с учетом определяющих их феноменов.

Для решения математических моделей задач, сформулированных с учетом механических феноменов и конструктивного исполнения ТОТЭ приняты ниже приводимые гипотезы:

- материалы слоев конструкции ведут себя как вязкоупругие тела при воздействии высокой температуры;
- потеря устойчивости конструкции происходит за пределами вязкоупругих деформаций, т.е. при потере устойчивости имеют место деформации ползучести;
- деформационное поведение конструктивно-многослойной пластины исследуется с учетом геометрической нелинейности. Объясняется это тем, что потеря несущей способности многослойной пластины происходит при прогибах, имеющих метрические показатели, сопоставимые с порядком ее толщины.

В результате решения математической модели получено условие прочности для дискообразной конструкции в виде:

$$\frac{3}{32} \frac{\alpha_1 + \alpha_2}{2} \Delta T = \frac{8}{35} \alpha^2 + \frac{1}{3} \gamma^2 \quad (1)$$

Отдельные слои и слоистые структуры, так и конструкция, планарной ТОТЭ в целом реагируют на термическое нагружение свойственно и по-разному. Различие в механическом поведении слоев многослойной конструкции способствует различного рода деформационным осложнениям за период ее эксплуатации. Деформационные осложнения характеризуются свойствами обратимости и остаточностью.

Проявляются они в виде:

- образования и прорастания трещин различных размеров, ориентации и протяженностей на анодной и катодной поверхностях;
- образования каверн, вследствие нарушения связанности слоев многослойной конструкции ТОТЭ (пары, соответственно, анод-электролит, электролит-катод);

- образования искривлений и набуханий за счет опережающей механической уязвимости отдельных слоев и конструкции в целом.

Можно сделать в итоге заключение о том, что проявление осложнений деформационного вида в многослойных конструкциях типа плоскообразной ТОТЭ в основном зависит от:

- структурно-механических и теплофизических свойств материалов слоев, а также наличия в их структуре начальных дефектов (неоднородность, клетчатость, перемятость, трещиноватость и др.);

- напряженного состояния многослойной макрокомпозитной конструкции, обусловленного термическим нагружением и сопутствующими факторами;

- физико-химических свойств и кинетических характеристик подачи и циркуляции рабочих агентов в системах подачи топлива и воздуха и т.д.;

Немаловажное значение в проявлении осложнений деформационного характера имеют также форма конструктивного исполнения ТОТЭ и сочетание ее геометрических характеристик.

Следовательно, правильный выбор и рациональное сочетание геометрических характеристик с формой конструктивного исполнения, а также условиями и режимом эксплуатации являются направлениями предупреждения различного рода осложнений деформационного вида [13]⁵.

В связи с этим поставлена задача, механическая модель которой представлена на рисунке 2.

С учетом краевых условий, уравнения равновесия деформируемой макрокомпозитной пластинки максимальные осевые перемещения крайних сечений внешних слоев представлены зависимостями:

$$\text{- для первого слоя - } w\left(\frac{l}{2}\right) = (h_1\alpha_1 + h_2\alpha_2)T; \quad (2)$$

⁵ Определение межслойных нагрузок в слоистых конструкциях, подвергаемых воздействию высоких температур. Мусави С.А., Хейрабади Г.С.

- для третьего слоя - $w\left(\frac{l}{2}\right) = (h_2\alpha_2 + h_3\alpha_3)T$;

где l – длина пластинки; $2h_1, 2h_2, 2h_3$ -толщины слоев макрокомпо-
зитной конструкции.

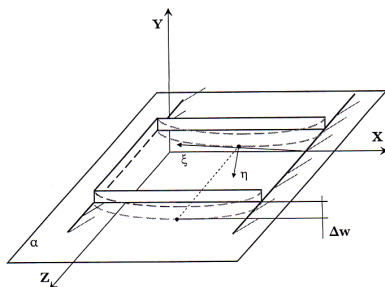


Рисунок 2. Механическая модель деформационного поведения пластинообразной ТОТЭ в виде многослойной композитной пластинки

Немаловажное значение в проявлении осложнений деформационного характера имеют также форма конструктивного исполнения ТОТЭ и сочетание ее геометрических характеристик.

Следовательно, правильный выбор и рациональное сочетание геометрических характеристик с формой конструктивного исполнения, а также условиями и режимом эксплуатации являются направлениями предупреждения различного рода осложнений деформационного вида.

В итоге установлено, что значения критических температур зависят от значения корней кубического уравнения нижеприводимого содержания:

- для шарнирно закрепленной пластинки:

$$A_1 C_1^3 + A_2 C_1^2 - A_3 = 0; \quad (3)$$

- для жестко закрепленной пластинки

$$A_4 C_1^3 + A_5 C_1^2 - A_6 C_1 + A_7 = 0, \quad (4)$$

где

$$\begin{aligned}
A_1 &= \frac{\pi b}{4 a}; \\
A_2 &= \frac{3}{4} \left(1 - \frac{h_2 \alpha_2}{h_1 \alpha_1} \right) \frac{9,6(1 + \nu_1)(1 - 2\nu_1)}{2\pi(1 - \nu_1)}; \\
A_3 &= \frac{1}{6} \left(\frac{h_1 \pi}{a} \right)^2 \left(1 - \frac{h_2 \alpha_2}{h_1 \alpha_1} \right) \frac{9,6(1 + \nu_1)(1 - 2\nu_1)}{2\pi(1 - \nu_1)}; \\
A_4 &= 3 \left[4 \left(1 + \frac{h_2 \alpha_2}{h_1 \alpha_1} \right) \frac{h_1 \pi}{a} \frac{9,6(1 + \nu_1)(1 - 2\nu_1)}{2\pi(1 - \nu_1)} \right]; \\
A_5 &= 4 \left[1 + \left(1 + \frac{h_2 \alpha_2}{h_1 \alpha_1} \right) 1 - \frac{h_2 \pi}{a} \frac{9,6(1 + \nu_1)(1 - 2\nu_1)}{2\pi(1 - \nu_1)} \right]; \\
A_6 &= 16 \left(\frac{h_1 \pi}{a} \right)^2 \left[\frac{h_1 \pi}{a} \frac{9,6(1 + \nu_1)(1 - 2\nu_1)}{2\pi(1 - \nu_1)} \right]; \\
A_7 &= 43 \left[\left(1 + \frac{h_2 \alpha_2}{h_1 \alpha_1} \right) \left(\frac{h_1 \pi}{a} \right)^3 \frac{9,6(1 + \nu_1)(1 - 2\nu_1)}{2\pi(1 - \nu_1)} \right].
\end{aligned} \tag{5}$$

Численная интерпретация полученных решений при исходных данных: продольной размер, соответственно, слоев— $a_1(\text{анод})=a_2(\text{электролит})=3,8$ мм; КТР, соответственно, $\alpha_1(\text{анод})=1,22 \cdot 10^{-5} \text{к}^{-1}$; $a_2(\text{электролит})=1,08 \cdot 10^{-5} \text{к}^{-1}$; толщина, соответственно, $h_1(\text{анод})=0,04$ мм; $h_2(\text{электролит})=0,15$ мм; коэффициент Пуассона, соответственно, $\nu_1(\text{анод})=0,32$ (график 1):

$$H_1 = \frac{\alpha_2 h_2}{\alpha_1 h_1}; \quad b_1 = \frac{h}{a} \cdot \pi = 1177,5$$

На графике 1 приводится зависимость критической температуры планарных ТОТЭ от геометрических характеристик, позволяющая проводить расчеты в прямом (когда задаются размеры и определяется операционная температура) и обратном (когда ограничиваются операционная температура и определяются рациональные соотношения размеров слоев) постановках.

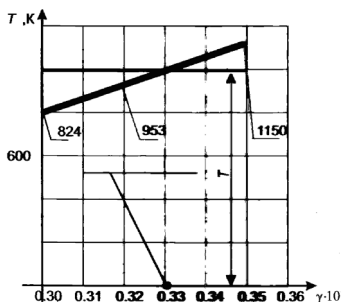


График 1. Зависимость критической температуры пластинообразных ТОТЭ от геометрических характеристик

Проведены также расчеты для сравнительной оценки температурной устойчивости моно и полислоиных конструкций. Установлено, что:

- полислоиные конструкции устойчивы при воздействиях температуры по сравнению с монослоиными конструкциями на $\approx (52 \div 58)\%$.

- для монослоиной конструкции устойчивость при операционной температуре равной 1000 К, обеспечивается при соотношениях размеров $\gamma = \frac{a}{h} \leq 28$;

Для полислоиной конструкции зависимость операционной температуры и соотношений размеров приводится на графике 2.

Рассмотрены задачи прочности и устойчивости и проведен анализ их результатов для ТОТЭ в пакетном исполнении, содержащего «n» количество одиночных слоев (график 2). Для этого варианта пакетного исполнения ТОТЭ определено предельное значение операционной температуры, при достижении которой возможно потеря устойчивости отдельных пластинок в пакете.

Применяя метод сечений и принцип независимости действия сил были определены их значения, действующие на поверхностях пластинок:

$$\left. \begin{aligned} P_{xi} &= E_i \varepsilon_{xi} S_x = E_i \left(1 + \nu_i \frac{b}{a} \right) \alpha_i T b h_i \\ P_{yi} &= E_i \varepsilon_{yi} S_y = E_i \left(1 + \nu_i \frac{b}{a} \right) \alpha_i T b h_i \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

где h – толщина i -той пластины в пакете.

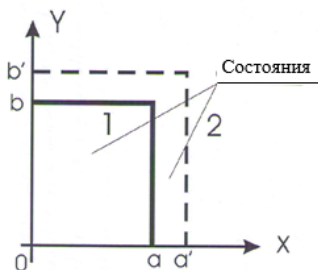


График 2. Пакетное исполнение ТОТЭ

Критическое значение операционной температуры для исследуемой конструкции пакетного исполнения ТОТЭ определено в виде:

$$T_{kr} = \frac{\pi^2 h_i^2}{12b(b + \nu_i a) \alpha_i}, \quad \text{где } J_{x \min} = \frac{\alpha h_i^3}{12}. \quad (7)$$

В результате для трех элементного пакета ТОТЭ определена и представлена на графике 3 зависимость коэффициента температурного расширения от критической температуры (кривая 1) и допустимых температурных нагружений от метрических характеристик (кривая 2), что позволяет создавать конструкции пакетов в ТОТЭ с приемлемыми метрическими характеристиками и теплофизическими свойствами отдельных слоев [15]⁶.

Полученные результаты позволяют сделать нижеприводимые обобщения для практики проектирование пакетов ТОТЭ и управления их деформационным поведением:

⁶ Экспериментальная установка и ее конструктивные особенности. Мусави С.А.

- при одинаковых метрических размерах и теплофизических свойствах материалов изготовления более уязвимыми в деформационном поведении являются крайние конструктивные элементы пакетного исполнения планарных ТОТЭ;

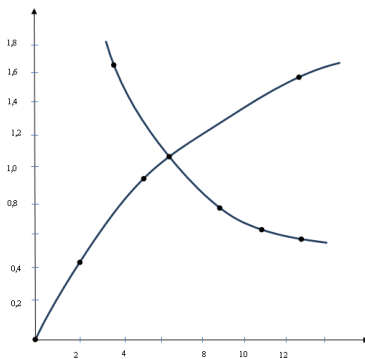


График 3. Зависимость температуры термоустойчивого пакета пластинок от их коэффициента термического расширения материального исполнения (кривая 1) и метрических характеристик (кривая 2 вычислялась при $\alpha = 1,2 \cdot 10^{-5} K^{-1}$).

- более чувствительными в определении значения температур, соответствующих критическому деформационному поведению пакетного исполнения планарных ТОТЭ пакетного исполнения из метрических характеристик являются толщины его конструктивных элементов. Причем, эта зависимость является квадратичной, что делает необходимым использование в пакете в качестве крайних конструктивных элементов с большими толщинами;

- при одинаковых метрических размерах для повышения термоустойчивости планарных ТОТЭ в пакетном исполнении необходимо при их проектировании использование элементов отдельных (ТОТЭ) с относительно низкими коэффициентами температурного расширения;

- уменьшение метрических размеров (длины и ширины) планарных ТОТЭ в пакетном исполнении способствует увеличению термической устойчивости конструкции причем на этой

зависимости никак не отражаются механические характеристики материалов изготовления отдельных элементов (отдельных ТОТЭ).

Четвёртая глава посвящена экспериментальному исследованию материального исполнения ТОТЭ.

Для классификации деформационного поведения планарных ТОТЭ в условиях операционных температур на образцах материалов их слоев проводились экспериментальные исследования нижеприводимого содержания:

- для определения механических характеристик материалов изготовления слоев ТОТЭ (т.е. μ – коэффициента Пуассона, E -модуля упругости, σ_{np} – предела пропорциональности, σ_T – предела текучести, σ_n – предела прочности), путем испытания на растяжение (сжатие) снимались характеристики $\sigma = \sigma(\varepsilon)$ этих материалов;

- для определения реологических свойств материалов изготовления слоев ТОТЭ (т.е. $\sigma_{np} = \sigma_{np}(t)$; $\sigma_T = \sigma_T(t)$; $\sigma_n = \sigma_n(t)$), необходимые для изучения в них релаксационных явлений и явления ползучести снимались зависимости $\sigma = \sigma(\varepsilon)$ при длительных действиях прилагаемых нагрузок.

Эксперименты проводились на установке АМИА 5-2, на которой испытывались образцы электролитов, изготовленные в ИПМ Украины и доставлены нам для испытания по НИР, выполняемой по гранту НАТО в рамках программы “Наука ради мира и безопасности”. Для проведения экспериментальных исследований были разработаны специальные приспособления с учетом поперечных сечений испытываемых образцов.

По проведенным теоретическим исследованиям можно заключить, что устойчивость составных конструкций, в основном зависит от факторов:

- прочностных и реологических свойств материалов слоев и дефектности их структуры (наличие трещиноватости, неоднородностей, перемятости и т.д.);

- напряженного состояния многослойного композита, обусловленного термомеханическим нагружением и сопутствующими факторами;

- электрохимических и физико-механических эффектами на поверхностных и контактных слоях конструкции, зависящих от физических свойств материалов;

- амплитуды и частоты колебания термомеханического воздействия на конструкцию;

- продолжительности эксплуатации;

- неравномерного нагружения составной конструкции, вызванного неравномерным омическим сопротивлением ее элементов за счет перераспределения структурных характеристик материалов под воздействием операционной температуры.

Во всех случаях, следовательно, основными критериями устойчивой эксплуатации ТОТЭ являются:

- фактор времени, т.к. он обуславливает снижение прочности и другие сопутствующие процессы.

- режим эксплуатации, т.к. обуславливает степень и характер нагружения конструкции и адекватное поведение материалов.

Существуют (или допускаются) нижеприводимые основные категории механического повреждения ТОТЭ:

- образование и прораствание трещин различных размеров, ориентации и протяженностей на элементах конструкции ТОТЭ;

- как результат спазматического (пульсационного, скачкообразного) колебания температурного воздействия мгновенное нарушение целостности элемента макрокомпозита с раскрытием трещин и с нарушением электрической сети;

- потеря устойчивости конструкции ТОТЭ до разрушения ее элементов;

- из-за агрессивности сред в системах подготовки топлива и воздуха коррозионное образование материалов элементов конструкции ТОТЭ.

Всем без исключения, осложнениям, проявляемые в результате деформационного поведения конструкций ТОТЭ под воздействием операционного термомеханического нагружения

независимо от его стадий свойственны (подлежат уточнению и требуют проведения соответствующих обобщений):

- видоизменения конструктивного исполнения ТОТЭ;
- виды осложнений деформационного типа;
- причинное проявление осложнения и их признаков;
- последствия деформационного проявления

Все это способствует:

- ухудшению физико-химических свойств и характеристик материального обеспечения конструкции ТОТЭ;
- снижению эффективности электрофизических и качественных показателей конструкции ТОТЭ.

На графиках 4-7 приведены кривые ползучести испытываемых образцов, полученные при различных температурных и постоянном механическом режимах нагружения.

Анализ кривых показывает, что развитие деформаций ползучести независимо от температурного режима нагружения происходит в двух стадиях: в стадии неустановившейся ползучести, скорость которой с течением времени уменьшается, и в стадии затухающей ползучести с постоянной скоростью деформации. Однако во всех случаях из-за пористой структуры образцов имеет место их вязкоползучая деформация.

Режимы нагружения экспериментальных образцов приведены на графиках 4 и 5.

В результате определены реологические характеристики материалов в виде кривых ползучести при различных температурных режимах.

Установлено, что развитие деформаций ползучести независимо от температурного режима нагружения происходит в двух стадиях, а именно:

- стадия неустановившейся ползучести, скорость которой с течением времени уменьшается;
- стадия затухающей ползучести с постоянной скоростью деформации.

Установлено, что при одинаковых условиях увеличение температурного показателя 7-8 раз увеличивает деформацию в 2,5-3 раза.

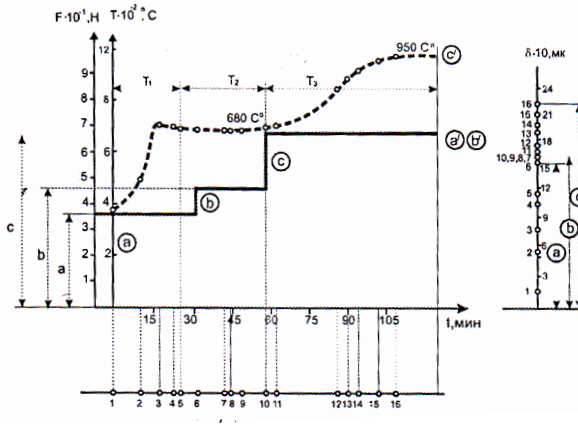


График 4. Режимные факторы программы испытаний образцов с квадратным поперечным сечением: а, b, c-соответственно, механическое нагружение при 3,5; 4,5; 6,5 Н: а', b', c'-соответствующие термомеханическое нагружение при изменениях: для $350 < a' < 680^{\circ}\text{C}$; для $b' \leq 680^{\circ}\text{C} = \text{const}$; для $680 < c' < 1000^{\circ}\text{C}$

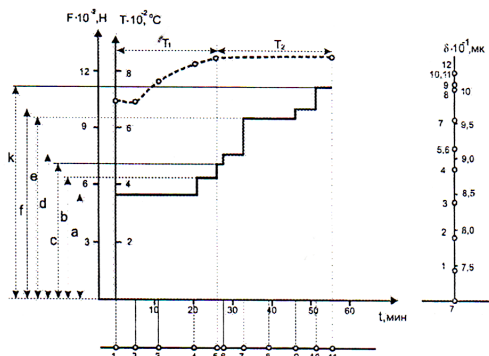
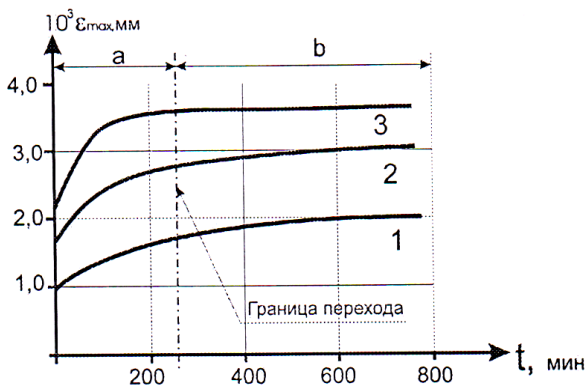


График 5. Режимные факторы программы испытаний с образцами круглого сечения: а, b, c, d, e, k-уровни механического, T1 и T2 режимы термического нагружений.



**График 6. Кривые ползучести при различных температурных режимах:
1-100°C; 2-400°C; 3-800°C.
а - область неустановившейся ползучести;
б - область затухающей ползучести.**

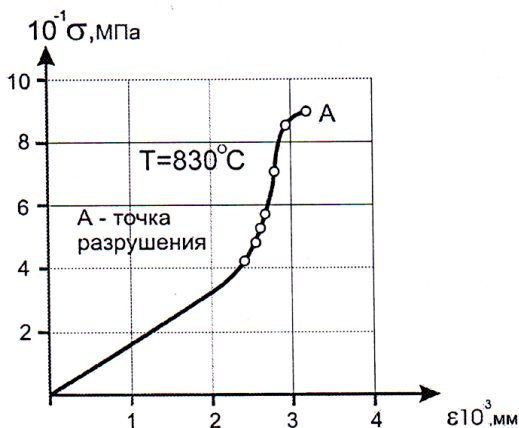


График 7. Зависимость $\sigma = f(\epsilon, t)$

Из-за достаточно большой пористости материала и относительно небольшой его механической прочности и в следствии чего наличия сильной релаксации термических напряжений будет способствовать снижению сопротивляемости элементов

конструкций из этого материала и их термомеханическому усталостному разрушению.

ВЫВОДЫ

1. Проведен анализ существующего класса топлив и подтверждена возможность эффективной утилизации ряда углеводородных соединений, в том числе, попутного газа, газогидратов и водорода в топливной системе низко и высоко температурных топливных элементов [3]⁷.

2. Изучены механические проблемы высокотемпературных твердооксидных топливных элементов и определены характерные феномены, влияющие на показатели их потребительского качества [9]⁸.

3. Для определения механических и реологических характеристик разработана методика высокотемпературного нагружения при кратковременном и продолжительном во времени действия нагрузок, которая позволяет оценивать длительную прочность и устойчивость конструкции топливных элементов, работающих под воздействием высоких температур.

4. Дана классификация и выявлены причины механических повреждений анодной и катодной поверхностей, влияющих на эффективность работы топливных элементов и даны рекомендации для проектирования материального исполнения их многослойной макрокомпозитной конструкций, подвергаемых в процессе эксплуатации депрессионному термомеханическому воздействию [13]⁹.

5. Разработана и решена математическая модель механического поведения топливных элементов с различной формой конструктивного исполнения и даны рекомендации по выбору

⁷ Электроэнергетический объект на базе нетрадиционных углеводородных ресурсов. Мусави С.А.

⁸ К вопросу решения механических проблем SOFC. Мусави С.А.

⁹ Определение межслойных нагрузок в слоистых конструкциях, подвергаемых воздействию высоких температур. Мусави С.А., Хейрабади Г.С.

рационального сочетания их геометрических характеристик с учетом формы исполнения и режимов эксплуатации.

6. Изучено механическое поведение отдельных топливных элементов в пакетном исполнении при термомеханических нагрузениях и разработаны рекомендации для предупреждения деформационного осложнения и проектирования конструктивно-технологических параметров стиков и повышения КПД в эксплуатационном процессе электроэнергетической установки топлива-топливный элемент.

7. Установлено, что при $\alpha_i = 1,2 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ рациональной геометрической характеристикой для планарного ТОТЭ в пакетном исполнении является значение $\gamma_i = 6 \cdot 10^{-2}$, это означает, что если относительная толщина крайнего элемента пакета ТОТЭ планарного исполнения $\gamma_i > 6 \cdot 10^{-2}$, то наступившее деформационное осложнение будет характеризоваться потерей устойчивости конструкции. В противном случае, т е при $\gamma_i < 6 \cdot 10^{-2}$ элементы ТОТЭ пакетного исполнения могут потерять устойчивость до появления пластичности в их материалах.

8. Определены пороговые значения метрических размеров, позволяющие в полной мере использовать потенциал устойчивости и прочности конструкций ТЭ планарной конструкции и разработаны рекомендации с целью реализации и финансирования в рамках различных программ для применения в практике проектирования.

9. Предложения, основанные на полученные диссертационные результаты включены в разработки, для выполнения в консорциумах международного уровня проектов для создания низко (SFP № G5366), средне (SFP № G5949) и высоко (SFP № G987898) температурных топливных элементов, принятых для финансирования в рамках программы НАТО “Наука ради мира и безопасности”, а также доложены на сессии Института Современных Исследований (ASI-Avanced Science Institute).

Основное содержание диссертации отражено в следующих опубликованных работах:

1. Rəhimov, A.M., Kipləşdiriciləri hazırlamaq üçün kompozisiya materialı, Patent İ2005 0088, 2003, 0132, Azərbaycan Respublikası / A.M.Rəhimov, R.Ə.Həsənov, İ.İ.Həsənov [və b.].

2. Həsənov, R.Ə., Магнитный ловитель. Patent МКИ: E21B31/06 , Azərbaycan Respublikası / R.Ə.Həsənov, İ.Y.Şirəli, S.X.Sadıqov [və b.].

3. Мусави, С.А. Электроэнергетический объект на базе нетрадиционных углеводородных ресурсов // Doktorantların və gənc tədqiqatçıların XVI Respublika Elmi konfransının materialları. – Bakı: – 2012, – s.110-113.

4. Мусави, С.А. К вопросу утилизации попутного нефтяного газа // Doktorantların və gənc tədqiqatçıların XVII Respublika elmi konfransının materialları. – Bakı: – 2013, – s.108-109.

5. Musəvi, S.A., Əkbərov, M.Q., Abışova, R.M. Boru kəmərinin stinger üzərində yatan hissəsinin gərginlik vəziyyəti // Doktorantların və gənc tədqiqatçıların Heydər Əliyevin anadan olmasının 90 illiyinə həsr olunmuş “Azərbaycan-2020: Neft-qaz sənayesinin inkişaf perspektivləri” adlı elmi-praktiki konfransının materialları, – Bakı: – 2013, – s.110-112.

6. Мусави, С.А. Обоснование возможности утилизации газовых гидратов в электрохимических генераторах // Материалы XV Международной молодежной научной конференции “Севергеоэкотех-2014” (часть II), – Ухта: УГТУ, – 2014, – с.208-213.

7. Мусави С.А. Современные электрохимические генераторы и их топлива // “Energetikanın müasir elmi-texniki və tətbiqi problemləri” Beynəlxalq elmi konfransının materialları, – Sumqayıt: – 2015, – s.83-84.

8. Həsənov, R.Ə., Gülgəzli, Ə.S., Musəvi, S.A. Механические проблемы SOFC и пути их решения // – Bakı: Azərbaycan Ali Texniki Məktəblərinin Xəbərləri, – 2015. №3(97), – s.37-46.

9. Мусави, С.А. К вопросу решения механических проблем SOFC // Doktorantların və gənc tədqiqatçıların XX respublika elmi

konfransının materialları (I cild), – Bakı: – 2016, – s.343-346.

10. Гасанов, Р.А., Гульгазли, А.С., Мусави, С.А. Термомеханическая устойчивость твёрдооксидных топливных элементов (SOFC) планарного исполнения // – Bakı: Azərbaycan Neft Təsərrüfatı jurnalı, – 2016. №1, – s.25-30.

11. Мусави, С.А. Влияние температурного фактора на показатели работоспособности SOFC пакетного исполнения // – Баку: Нефтепереработка и нефтехимия, – 2016. №11, – с.25-31.

12. Hasanov, R.A. About the use of power potential of technological parameters for picking shut down matters in the well bottom with magnet instruments / Ramiz Hasanov, Musa Kazimov, Qazela Kheyraadi [et al.] // Znanstvgená Misel, – 2017. vol.I, №8, – p.95-97.

13. Мусави, С.А., Хейрабади, Г.С. Определение межслойных нагрузок в слоистых конструкциях, подвергаемых воздействию высоких температур // – Нижневартовск: Научный журнал (scientific journal) “Бюллетень науки и практики” – “Bulletin of Science and Practice”, – 2018. т.6. №6, – с.128-136.

14. Hasanov, R.A. Substantiation of parameters for long-term strength testing of materials / Ramiz Hasanov, Aydin Babaev, Musa Kazimov [et al.] // International Advanced Research Journal in Science, Engineering and Technology, 2018. vol.5. is. 2, Febraury, – pp.9-15.

15. Мусави, С.А. Экспериментальная установка и ее конструктивные особенности // Сборник статей XXV Международной научно-практической конференции “Наука и образование: сохраняя прошлое, создаём будущее”, – Пенза: – 10 декабря, – 2019, – с.95-98.

16. Мусави, С.А. Определение прочностных характеристик ТОТЭ для круглого дискообразного исполнения // – Bakı: Mühəndis mexanikası, – 2020. № 1 (1), – с.67-71.

17. Мусави, С.А. Исследование наборов твердооксидных топливных элементов в пакетном исполнении // – Нижневартовск: Научный журнал (scientific journal) “Бюллетень науки и практики” – “Bulletin of Science and Practice”, – 2021. т.7. №12, – с.175-184.

18. Hasanov, R.A., Allahverdiyev, Sh.N., Musavi, S.A. Heavy and ultra-heavy oilfield development via well borehole heating // Petroleum&Petrochemical Engineering Journal, – 2021. December. – p.1-14.

19. Мусави, С.А. Исследование наборов твердооксидных топливных элементов в пакетном исполнении // Materials of the XXVI International Scientific Symposium: “Şuşa: Triumph of Victory”, – Eskişehir: – May 29, – 2022. – p.302-305.

Личный вклад автора в опубликованных работах в соавторстве:

[3,4,6,7,9,11,15,16,17,19] – выполнены автором самостоятельно;

[1,2,5,8,10,12,13,14,18] – исследование, анализ, обработка результатов.

Защита диссертации состоится 18 октября 2022-го года в 11⁰⁰ на заседании Диссертационного Совета ЕД 2.09, действующего на базе Азербайджанского Технического Университета

Адрес: AZ1010, г.Баку, проспект Г.Джавида, 25.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Азербайджанского Технического Университета.

Электронная версии диссертации и автореферата размещена на официальном сайте Азербайджанского Технического Университета (www.aztu.edu.az)

Автореферат разослан по соответствующим адресам 16 сентября 2022-го года.

Подписано в печать: 15 сентября 2022 г.

Формат бумаги: А5

Объём: 36476

Тираж: 70