

## **ОТЗЫВ**

официального оппонента на диссертацию Старостина Игоря Евгеньевича по теме **«Научные основы оценивания работоспособности перспективных авиационных химических источников электрической энергии для поддержания летной годности воздушных судов»** по специальности 05.22.14 – Эксплуатация воздушного транспорта на соискание ученой степени доктора технических наук.

На отзыв представлена диссертационная работа, содержащая 328 страниц, 6 разделов, 215 рисунков, 21 таблицу, библиографический список из 355 наименований, а также ее автореферат. Объем и структура диссертации и автореферата соответствуют рекомендациям ВАК РФ и ГОСТ Р 7.011-2011.

### **Актуальность темы исследования.**

Летная годность воздушных судов в значительной степени определяется работоспособностью электрооборудования, где важнейшую роль играют химические источники электрической энергии. Использование перспективных литий-ионных батарей (ЛИАБ) в качестве источника электрической энергии характеризуется их высокой энергоемкостью и удовлетворительными удельными массогабаритными характеристиками. Очевидно, что безотказная работа оборудования летательных аппаратов в значительной степени обуславливается устойчивой работой таких химических источников электрической энергии.

Однако известные особенности эксплуатации ЛИАБ требуют вполне конкретных решений для создания условий качественного обслуживания аккумуляторов и батареи в реальном времени режимов их заряда и разряда. Такие решения возможны только при системном подходе к анализу протекающих физико-химических процессов (ФХП) в аккумуляторах и предсказанию нежелательных аварийных ситуаций в батарее. Следует отметить, что существующие научные подходы анализа работоспособности ЛИАБ с применением априорных электрохимических и статистических моделей аккумуляторов не всегда обеспечивают достижение желаемого результата. Наиболее эффективным вариантом оценки характеристик ФХП при эксплуатации ЛИАБ является использование апостериорной информации на основе измеряемых переменных: токов заряда/разряда, напряжения и температуры аккумуляторов.

Таким образом, разработка теоретических методов для исследования химических источников электрической энергии, направленных на повышение эффективности оценивания состояния элементов и химической среды аккумуляторов ЛИАБ, и их внедрение в

виде математического, алгоритмического и программного обеспечения определили цель и задачи, поставленные в работе, ее актуальность, теоретическую новизну и практическую значимость.

### **Общая методология исследования.**

Автором диссертации в результате анализа материалов литературных источников определены основные недостатки существующих подходов к адекватному моделированию ФХП, протекающих в химических источниках электрической энергии, а также проблемы, требующие решения в рассматриваемой предметной области. В соответствии с ними первоначально была решена задача формирования полноразмерной нелинейной термодинамической модели ФХП, учитывающей особенности литий-ионного аккумулятора (ЛИА), как объекта исследования, и приведения ее к варианту, пригодному для практического применения. Предложенный научный подход был положен в фундамент разработки методологии численно-аналитического описания ЛИА, как источника электрической энергии. Естественным продолжением работы явилась реализация предложенных вычислительных структур в виде имитационных моделей и алгоритмов, позволяющих создавать математическое, алгоритмическое и программное обеспечение для оценивания и прогнозирования текущей работоспособности химических источников электрической энергии.

В заключительной части работы приведен тестовый пример практического использования созданной методологии моделирования и прогнозирования развития ФХП в химических источниках электрической энергии для оценки износа электродов литий-ионного аккумулятора конкретной батареи. Все это придает диссертации завершённый характер, как с научной, так и с практической точки зрения. Итоги выполненных теоретических исследований и вычислительных экспериментов легли в основу формулировок научной новизны и положений, выдвигаемых автором на защиту.

### **Оценка структуры и содержания работы.**

В целом диссертационная работа имеет четкую логическую взаимосвязанную структуру. Она хорошо проиллюстрирована и демонстрирует глубокие знания автором вопросов, относящихся к теоретической стороне выполненных исследований и практической реализации технических решений.

**Во введении** обоснована актуальность диссертационной работы, сформулирована цель, поставлены задачи исследования, показана научная новизна и практическая цен-



ность выполненных исследований, представлены основные положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** приведен обширный обзор литературных источников и выполнен анализ проблем, возникающих при эксплуатации существующих и перспективных авиационных источников электрической энергии. Установлена необходимость непрерывной диагностики и обеспечения эффективного контроля и управления текущим состоянием литий-ионных аккумуляторов батареи. Для создания основополагающей методологии своевременной оценки работоспособности химических источников электрической энергии предлагается использовать потенциально-поточный метод в рамках теории неравновесной термодинамики.

**Вторая глава** посвящена подробному математическому описанию и исследованию динамических свойств ФХП в различных объектах с позиций современной термодинамики. Доказана кинетическая теорема неравновесной термодинамики, которая позволила определить скорости протекания упомянутых процессов, используя систему потенциально-поточных уравнений.

Предложен вариант численного решения созданной нелинейной и нестационарной аналитической модели ФХП, позволяющий, в итоге, установить однозначную связь ее координатного пространства с измеряемыми переменными реального объекта исследований.

Глава 2 является базовой, на нее автор опирается при построении моделей ФХП пониженной размерности для решения задач диагностики и прогнозирования состояния рассматриваемых объектов (глава 3), при разработке программного обеспечения среды моделирования алгоритмов диагностики и прогноза протекания контролируемых процессов (глава 4) и проведении вычислительных и натуральных экспериментов (главы 5 и 6).

**В третьей главе** рассматривается технология понижения порядка полноразмерной нелинейной модели ФХП к определенному виду упрощенной модели, позволяющая выделить измеряемые (наблюдаемые) и неизмеряемые (ненаблюдаемые) переменные состояния протекающих процессов. Для подтверждения адекватности таких моделей используются данные лабораторных исследований или тестовых натуральных испытаний химических источников энергии. При решении задачи оценивания неизмеряемых переменных предлагается использовать декомпозицию исходной системы уравнений большой размерности. При этом предпочтение отдается таким вычислительным алгоритмам, которые обеспечивают максимальную помехозащищенность и наименьшее время оценивания неизмеряемых переменных в случае использования экспериментальных данных для построения моделей химических источников электрической энергии.

Вопросам создания программной вычислительной среды моделирования ФХП, ее использования для диагностики состояния и апробации работоспособности литий-ионного аккумулятора посвящены главы **с четвертой по шестую**. В них изложены принципы организации распределенной вычислительной среды моделирования алгоритмов диагностики и прогнозирования для процессов различной физической и химической природы. Архитектура вычислительной среды обладает свойством масштабируемости моделей исследуемых процессов и предполагает наличие интеллектуальных баз данных, что позволяет значительно расширить область ее применимости. Итогом работы созданной вычислительной среды являются текущие и прогнозные значения фактической емкости литий-ионного аккумулятора, которые характеризуют его работоспособность.

В заключительном разделе диссертации автор приводит описание экспериментальной установки для апробации методологии и алгоритма оценивания работоспособности химических источников энергии на примере литий-ионного аккумулятора конкретного типа. Показано, что критериями работоспособности данного типа аккумуляторов, кроме текущей разрядной емкости, могут служить напряжение и температура. Отмечается высокая степень адекватности численно-аналитических динамических моделей разрядной емкости и напряжения исследуемого аккумулятора. Так, относительная погрешность модели разрядной емкости не превышает 8,5%, модели напряжения – не более 11,5%.

#### **Степень обоснованности и достоверности научных положений, выводов и рекомендаций.**

Основные научные выводы и положения подтверждаются аналитическими доказательствами, данными моделирования, полученными в программной среде для математических расчетов SciLab, а также экспериментальными исследованиями на испытательном стенде с промышленно выпускаемыми литий-ионными аккумуляторами. Все теоретические достижения аргументированы, результаты исследований логически непротиворечивы и не идут вразрез с базовыми положениями теории неравновесной термодинамики.

#### **Научная новизна и практическая значимость полученных результатов.**

Научная новизна включает новые математические модели ФХП, методологию оценивания работоспособности химических источников энергии, реализованных в виде набора конкретных методов и моделей, математическое обоснование алгоритмических решений. Основную научную новизну составляют:



1) методология оценивания работоспособности авиационных химических источников энергии с использованием современной теории неравновесной термодинамики для описания процессов различной физико-химической природы и доказанной автором кинетической теоремы;

2) потенциально-поточковый метод моделирования ФХП в авиационных химических источниках энергии, использующий кинетическую теорему неравновесной термодинамики и численно-аналитические модели;

3) методы и алгоритмы определения неизмеряемых переменных состояния ФХП в литий-ионных аккумуляторах для оценивания их работоспособности;

Практическую значимость имеют комплекс программных модулей вычислительной среды моделирования ФХП и конкретные рекомендации по определению функциональной работоспособности литий-ионного аккумулятора. Ценностью для практического использования является следующее:

1) вычислительные программы, реализующие математические модели литий-ионного аккумулятора в полуавтоматическом режиме работы;

2) вычислительные программы, обеспечивающие выполнение алгоритмов диагностики и прогнозирования характеристик и параметров ЛИАБ;

3) методика определения текущей функциональной работоспособности литий-ионного аккумулятора в батарее;

4) программы обработки временных рядов экспериментальных данных: напряжения и температуры ЛИА при известном характере изменения зарядного и разрядного токов.

#### **Значение выводов и рекомендаций для науки и практики.**

Разработан научно обоснованный подход к созданию разновидностей моделей ФХП в химических источниках энергии, учитывающий особенности их применения в авиационной технике. На основе этих моделей созданы методы, алгоритмическое и программное обеспечение для реализации процедур диагностики и прогнозирования состояния литий-ионных аккумуляторных батарей с целью оценивания их работоспособности в режиме эксплуатации.

Полученные в диссертации решения статистически устойчивы к присутствию искажений в измерительных данных систем диагностики и прогнозирования состояния ЛИА, а также при случайном характере аналого-цифровых преобразований информационных сигналов и могут быть реализованы на цифровых устройствах отечественного производства с ограниченными вычислительными ресурсами.

### **Соответствие содержания автореферата содержанию диссертации.**

Содержание автореферата полностью отражает текстовый материал диссертационной работы, полученные в ней научные результаты, основные выводы и приведенные рекомендации.

### **Соответствие содержания диссертации содержанию опубликованных работ.**

Основные результаты исследования опубликованы в 95 печатных работах, которые включают: 3 монографии, 23 статьи в журналах из перечня ВАК, 7 свидетельств на программу для ЭВМ, 81 статью в журналах и сборниках научных трудов. Защищаемые положения, выводы и рекомендации достаточно полно отражены в публикациях автора.

### **Соответствие темы диссертации заявленной научной специальности.**

Тема диссертационной работы соответствует паспорту специальности 05.22.14 – Эксплуатация воздушного транспорта по следующим пунктам:

- разработка научных основ и методов обеспечения и сохранения летной годности воздушных судов в процессе эксплуатации, так как выполненные автором исследования позволили разработать методологию оценивания работоспособности химических источников энергии на основе теории неравновесной термодинамики;
- разработка моделей и методов анализа и оценки уровня эксплуатационно-технических характеристик авиационной техники, поскольку предложенные модели и основанные на них алгоритмы, учитывающие нестационарность, нелинейность и другие специфические особенности конструктивного исполнения литий-ионных аккумуляторов, позволили разработать принципиально новые подходы к определению их характеристик в процессе эксплуатации;
- разработка методов и средств диагностирования и прогнозирования технического состояния авиационной техники, поскольку в результате теоретических исследований созданы новая архитектура вычислительной среды, комплекс алгоритмов и программ для диагностики и прогнозирования состояния перспективных авиационных химических источников электрической энергии.

### **По диссертации имеются следующие вопросы и замечания:**

1. Для верификации моделей ФХП используются лабораторные исследования и измерительные датчики, позволяющие получить экспериментальные данные в виде временных рядов. Здесь возникают, по крайней мере, два вопроса. Во-первых, насколько процентов снижается адекватность частных моделей ФХП по сравнению с полным их



описанием и как это отражается на критерии работоспособности аккумуляторной батареи? Второй вопрос. Очевидно, что в условиях штатной эксплуатации ЛИАБ невозможно определить параметры физико-химической среды аккумуляторов лабораторным путем. Здесь возникает ситуация, когда необходимо использовать априорные частные модели ФХП, основанные на измерительной информации и учитывающие деградацию свойств элементов аккумулятора. Учитывают ли алгоритмы диагностики состояния батареи и прогнозирования ее работоспособности изменчивость параметров физико-химической среды в реальном времени?

2. Позволяют ли созданные модели ФХП и алгоритмы оценивания работоспособности предугадать возникновение локальной области нагрева и тепловой разгон на поверхности электрода литий-ионного аккумулятора в режимах его заряда или разряда?

3. Эксплуатация ЛИАБ в качестве источника энергии ответственного оборудования предполагает обязательное использование байпасных устройств, выводящих неисправный аккумулятор из состава батареи с целью сохранения ее функциональной работоспособности. Имеется ли возможность согласованного взаимодействия алгоритмов диагностики и прогнозирования состояния ФХП в аккумуляторе с алгоритмом управления байпасного устройства в режиме реального времени?

### **Заключение.**

Диссертационная работа Старостина Игоря Евгеньевича по теме «Научные основы оценивания работоспособности перспективных авиационных химических источников электрической энергии для поддержания летной годности воздушных судов» является завершенной научно-квалификационной работой, выполненной на актуальную тему. В этой работе решена важная научная проблема оценивания работоспособности авиационных химических источников электрической энергии, характеризующихся нелинейными и нестационарными физико-химическими процессами и недостаточной измерительной информацией о переменных состоянии в процессе эксплуатации.

Полученная в ходе диссертационных исследований совокупность новых теоретических и прикладных результатов свидетельствует о значительном вкладе автора в методологию использования теории неравновесной термодинамики для оценивания работоспособности химических источников электрической энергии, практику создания алгоритмов диагностики и прогнозирования состояния литий-ионных аккумуляторных батарей, используемых в современном авиационном оборудовании.

По своей актуальности, научной новизне, объему выполненных исследований и практической значимости полученных результатов, представленная работа соответствует требованиям ВАК РФ по п. 9 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24.09.2013 г., предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора наук, а ее автор Старостин Игорь Евгеньевич заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 05.22.14 – Эксплуатация воздушного транспорта.

Официальный оппонент:

д.т.н., профессор

Букреев Виктор Григорьевич,  
профессор отделения электроэнергетики и  
электротехники Инженерной школы  
энергетики ФГАУ ВО «Национальный  
исследовательский Томский  
политехнический университет»

Докторская диссертация защищена  
по специальности 05.13.06 – Автоматизация  
и управление технологическими процессами  
и производствами (по отраслям)

Адрес места основной работы:

634050, г. Томск, пр. Ленина, 30, ФГАУ ВО  
«Национальный исследовательский  
Томский политехнический университет»,  
рабочий тел.: +7 (3822) 606106, вн. т. 1991  
сот. тел.: 9138542196

web-сайт: [www.tpu.ru](http://www.tpu.ru)

адрес эл. почты: [bukreev@tpu.ru](mailto:bukreev@tpu.ru)

Подпись В.Г. Букреева заверяю:

Ученый секретарь Ученого совета  
Национального исследовательского  
Томского политехнического университета

Екатерина Александровна Кулинич



12 января 2022 года