

Экз. № \_\_\_\_\_

Ученому секретарю  
диссертационного совета Д223.011.01  
ФГБОУ ВО «МГТУ ГА»

САМОЙЛЕНКО В.М.

### **ОТЗЫВ**

официального оппонента Мусина Сергея Миргасовича на диссертационную работу СТАРОСТИНА Игоря Евгеньевича на тему: «Научные основы оценивания работоспособности перспективных авиационных химических источников электрической энергии для поддержания летной годности воздушных судов», представленную на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.22.14 – Эксплуатация воздушного транспорта

Диссертация СТАРОСТИНА Игоря Евгеньевича посвящена решению актуальной для воздушного транспорта проблемы эксплуатации перспективных высокочастотных авиационных химических источников электрического тока на основе изучения их физико-химических процессов методами неравновесной динамики, что позволило сформировать систему эксплуатации авиационных литий-ионных аккумуляторных батарей по техническому состоянию с контролем параметров и поддерживать их работоспособное состояние на полном жизненном цикле.

В работе представлена методология оценивания работоспособности перспективных литий-ионных авиационных химических источников электрической энергии, которая включает: обзор методов диагностирования, прогнозирования и моделирования химических источников тока, обзор физико-химических процессов в химических источниках электрической энергии, синтез уравнений неравновесной динамики физико-химических процессов в химических источниках электрической энергии, математические модели динамики физико-химических процессов в литий-ионных авиационных аккумуляторах.

Опыт применения авиационных химических источников тока, авиационных аккумуляторных батарей, на воздушных судах показывает их важную роль в безопасном завершении полета и поддержания летной годности воздушных судов.

Решение поставленной в работе научной проблемы, разработка методологии оценивания работоспособности авиационных литий-ионных химических источников тока в эксплуатации, осуществляется за счет контроля значений параметров, полученных по диагностической модели определения емкости и температурного режима функционирующей батареи и модели прогнозирования ее предотказных состояний.

Методология решения научной проблемы позволила увеличить достоверность выявления предотказных состояний литий-ионных авиационных батарей, проходящих опытную эксплуатацию и осуществлять ее эффективное техническое обслуживание.

Исследование, проведенное в данной диссертационной работе, направленное на решение указанной проблемы, является актуальным, способствует повышению безопасности полетов, и имеет важное хозяйственное значение в области воздушного транспорта.

На основании теоретических и экспериментальных исследований получена необходимая и достаточная информация для разработки системы технической эксплуатации литий-ионных авиационных аккумуляторных батарей.

Теоретические и экспериментальные исследования проводились в условиях ФГБОУ ВО «МГТУ ГА», ООО «Экспериментальная мастерская Наука-Софт», из которых получены акты реализации результатов исследования.

**Цель работы** заключается в создании технологии эксплуатации перспективных авиационных литий-ионных химических источников электрического тока по состоянию с контролем параметров до предотказного состояния в целях сохранения летной годности воздушных судов в процессе их эксплуатации.

По цели исследования и решаемым научным задачам, составляющим научную проблему, исследование проведено по специальности 05.22.14 «Эксплуатация воздушного транспорта», пункты: 5.9 «Разработка методов и средств диагностирования и прогнозирования технического состояния авиационной техники и метрологическое обеспечение», 5.11 «Разработка научных основ и методов обеспечения и сохранения летной годности воздушных судов в процессе эксплуатации», 5.12 «Разработка моделей и методов анализа и оценки уровня эксплуатационно-технических характеристик авиационной техники» согласно паспорту.



**Научная новизна**, имеющая важное значение для науки и практики, заключается в следующем:

- разработана методология оценивания работоспособности перспективных высокоемкостных авиационных химических источников электрической энергии, включающая в себя системный подход получения диагностических и прогностических моделей авиационных химических источников тока различной физической и химической природы;

- сформулирована и доказана кинетическая теорема современной неравновесной термодинамики, которая явилась основой потенциально-поточного метода моделирования физико-химических процессов в авиационных химических источниках электрической энергии;

- разработан потенциально-поточный метод формирования математических моделей неравновесных физико-химических процессов в перспективных высокоемкостных авиационных химических источниках электрической энергии;

- получена полная математическая модель литий-ионных аккумуляторов, являющаяся основой для создания диагностических и прогностических моделей, в которой в отличие от известных моделей учитывается динамика физико-химических процессов.

**Практическая ценность и реализация** результатов исследований определяется тем, что решение научной проблемы и технологические решения внедрены в ООО «Экспериментальная мастерская Наука-Софт» и ФГБОУ ВО «МГТУ ГА» в виде:

- методики диагностирования и прогнозирования технического состояния авиационных литий-ионных аккумуляторов, позволяющая выявлять их предотказные состояния в процессе эксплуатации в составе авиационной аккумуляторной батареи;

- цифровой методологии моделирования физико-химических процессов на основе современной неравновесной термодинамики химических источников электрической энергии (свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2018666596, № 2019616182);

- цифровой методологии численно-аналитического преобразования уравнений физико-химических процессов в химических источниках электрической энергии (свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021614958, № 2021614877);

- результаты полунатурного моделирования процессов диагностирования и прогнозирования фактической емкости, напряжения (ЭДС) и температуры каждого элемента авиационных литий-ионных аккумуляторных батарей типовых литий-ионных аккумуляторов серии Sony US18650VTC6 в процессе их эксплуатации с учетом процесса старения.

### **Оценка достоверности результатов:**

- **практические** результаты получены при экспериментальных исследованиях типовых литий-ионных аккумуляторов серии Sony US18650VTC6;

- **теория построена** на методах неравновесной динамики, аксиоматике современной термодинамики, положениях системного анализа и теории надежности технических средств, дискретной математики и теории цифровой обработки при решении частных научных задач; математическом и прогностическом моделировании физико-химических процессов, протекающих в литий-ионных химических источниках электрического тока, факторном анализе и статистике экспериментальных данных и согласуется с опубликованными материалами по теме диссертации;

- **идея базируется** на потенциально-потокном методе построения диагностических и прогностических моделей в рамках современной неравновесной термодинамики;

- **использованы** данные, полученные другими авторами по рассматриваемой тематике, для сравнения авторских данных. Сравнение показало непротиворечивость результатов расчета;

- **установлено** качественное и количественное совпадение авторских результатов с результатами оценки работоспособности аккумуляторов серии Sony US18650VTC6;

- **использованы** современные методики организации математического и имитационного эксперимента, сбора и обработки исходной информации, представительные выборочные совокупности.

### **Личный вклад соискателя состоит в:**

- создании компьютерной методологии технической эксплуатации литий-ионных авиационных аккумуляторных батарей;

- развитию теории неравновесной динамики относительно физико-химических процессов, протекающих в химических источниках электрической энергии различной электро-химической системы;

- личном участии в создании методологии численно-аналитического преобразования уравнений физико-химических процессов в химических источниках электрической энергии и проведении вычислительного и натурального экспериментов;

- физической и целевой интерпретации экспериментальных данных, полученных лично автором;

- личном участии в апробации результатов исследования;

- подготовке основных публикаций соискателя по выполненной работе.



**Апробация работы.** Основные положения диссертации доложены и обсуждены на: международной конференции «Инфо», г. Сочи, 2010 - 2014 гг., 2019 - 2021 гг.; I международном симпозиуме «Компьютерные измерительные технологии», г. Москва, 2015 г.; международном симпозиуме «Надежность и качество», г. Пенза, 2011, 2012, 2014, 2015, 2018, 2020 гг.; всероссийской научно-технической конференции «Научные чтения по авиации, посвященные памяти Н.Е. Жуковского», г. Москва, 2013-2015 гг., 2019 г.; научно-технической конференции «Электрификация летательных аппаратов», г. Москва, 2016 г.; научном семинаре по проблемам авиационно-космической электроэнергетики им. академика В.С. Кулебакина, г. Москва, ИПУ РАН, 2017 г.; семинаре по синергетике, г. Москва, МГУ им. М.В. Ломоносова, 2013 г.; международной конференции молодых специалистов по микро/нанотехнологиям и электронным приборам «EDM», г. Новосибирск, 2019, 2021 гг.; международной конференции «ПИЭР 2020», г. Новосибирск, 2020 г.; международной конференции «Информационные технологии и инновации на транспорте», г. Орел, 2021 г.

**В первой главе** диссертации проведен целевой анализ проблем эксплуатации авиационных источников электрической энергии и основных их качественных факторов, влияющих на обеспечение летной годности воздушных судов, обоснованы пути решения проблемы оценки работоспособности литий-ионных химических источников электрического тока в эксплуатации.

Определены пути развития методологии оценивания работоспособности химических источников электрической энергии относительно физико-химических систем: электрохимического ряда напряжений и стандарта электродных потенциалов.

Следует заметить, что результаты целевого анализа методов формирования системы эксплуатации авиационных химических источников электрической энергии на основе оценки работоспособности авиационных аккумуляторных батарей на этапах жизненного цикла не в полной мере нашли свое отражение в работе.

**Во второй главе** на основе кинетической теоремы современной неравновесной термодинамики и потенциально-потокowego метода сформированы системы уравнений физико-химических процессов функции состояния свойств вещества и процессов; кинетические матрицы простых подсистем; функциональные разложения потенциалов взаимодействия, тепловых эффектов внешних потоков и теплоемкостей; методы экспериментального определения коэффициентов функциональных разложений относительно веществ, используемых в химических источниках электроэнергии.

Доказанная кинетическая теорема и потенциально-потокowe методы разложения обладают научной новизной и практической значимостью.

**Третья глава** посвящена разработке численно-аналитических моделей диагностики и прогнозирования технического состояния химических источников электрического тока из уравнений физико-химических процессов, полученных потенциально-потокосовым методом. Приведена формализация построения диагностических и прогностических моделей физико-химических систем химических источников электрического тока.

**Четвертая глава** посвящена программной реализации методологии использования диагностических и прогностических математических моделей, которая содержит концепцию распределенной информационной системы применения методологии использования диагностических и прогностических математических моделей.

Компьютерная методология численно-аналитического преобразования уравнений физико-химических процессов в химических источниках электрической энергии обладает научной новизной и практической значимостью и защищена свидетельствами о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021614958, № 2021614877.

**Пятая глава** содержит процедуру формирования и применения рабочей диагностической модели литий-ионного авиационного аккумулятора, состоящей из этапов построения математической модели, модели физико-химических процессов, критериев работоспособности, функций состояния свойств веществ и процессов в литий-ионных аккумуляторах, оценку диапазонов параметров физико-химических процессов в литий-ионных аккумуляторах в виде зарядно-разрядных и критериальных кривых. В качестве критериев выбраны зарядный критерий – ЭДС по интеркаляции ионов лития на отрицательном электроде и разрядный критерий – ЭДС по деинтеркаляции ионов лития на положительном электроде.

**В шестой главе** приведены результаты апробации научных основ оценивания работоспособности химических источников электрической энергии на примере литий-ионных аккумуляторов серии Sony US18650VTC6 в виде математической модели напряжения (ЭДС) и рабочей температуры аккумулятора в режиме разряда постоянным током при воздействии внешних факторов, синтеза диагностической модели по емкости и температуре аккумуляторной батареи, математической модели прогнозирования предотказных состояний аккумуляторной батареи и рекомендации по применению прогностической модели при эксплуатации литий-ионных авиационных аккумуляторных батарей по техническому состоянию с контролем параметров.

**В целом** все главы диссертации отражают глубину проработки рассматриваемых в них вопросов и подтверждают заявленную автором новизну полученных результатов исследований.



Текст диссертации написан грамотно, на хорошем научном и техническом языке. Выводы по главам отсутствуют. Работа оформлена аккуратно, достаточно хорошо изучается, хотя содержит ряд неточностей, стилистически неправильно построенных фраз и предикативных наречий вида «как нетрудно видеть» и др. Содержание автореферата достаточно полно отражает основные положения диссертации.

**Публикация** материалов диссертационной работы характеризуется 95 работами, среди них 30 научных статей в изданиях, рекомендованных перечнем ВАК при Минобрнауки России, 9 статей в изданиях, входящих в систему цитирования Scopus, 3 рецензируемыми монографиями, 7 свидетельствами о регистрации программ для ЭВМ.

#### **Основные замечания по диссертации.**

1. Не представлен личный вклад соискателя.
2. Не представлены формализованные постановка проблемы и ее решение.
3. Теоретические и экспериментальные исследования работоспособности литий-ионных химических источников электрической энергии не содержат итоговый результат их деградации или отказа: источник идет в обрыв или в короткое замыкание?
4. Система уравнений физико-химических процессов функции состояния свойств вещества физико-химической системы химического источника электрической энергии содержит коэффициенты функциональных разложений, которые в диссертации определяются экспериментально, т.е. детерминировано на среднем времени, тогда как они являются функционалами относительно климатических и эксплуатационных факторов на времени нахождения в климатической зоне аэропортов.
5. Теоретические и экспериментальные исследования работоспособности литий-ионных химических источников электроэнергии не содержат итоговый результат по параметрам их потока отказов.

Указанные недостатки не являются принципиальными для общей оценки выполненной диссертационной работы.

Результаты работы могут быть использованы научными, образовательными, производственными и эксплуатирующими предприятиями и учреждениями авиационной отрасли.

### **ВЫВОД**

Диссертация СТАРОСТИНА Игоря Евгеньевича является законченной научно-квалификационной работой, выполненной в соответствии с пп. 9-11, 13, 14 действующего Положения о порядке присуждения ученых степеней. В диссертации изложено решение научной проблемы по разработке научных основ оценивания

работоспособности перспективных высокочастотных авиационных химических источников электрической энергии, обладающих улучшенными качествами при эксплуатации воздушных судов гражданской авиации, имеющей существенное значение для обеспечения эффективности воздушного транспорта России. Приведены научно обоснованные рекомендации по эксплуатации литий-ионных авиационных аккумуляторных батарей по состоянию с контролем параметров.

Качество и объем проведенных актуальных исследований, полученные теоретические результаты и практическая значимость удовлетворяют требованиям ВАК России, предъявляемым к докторским диссертациям, работа соответствует «Положению о порядке присуждения ученых степеней», а автор, СТАРОСТИН Игорь Евгеньевич, заслуживает присуждения ему ученой степени доктора технических наук.

#### ОФИЦИАЛЬНЫЙ ОППОНЕНТ

Заместитель по эксплуатации директора ОКБ-главного конструктора АО «УАПО»  
доктор технических наук (20.02.17), профессор (20.02.14)

С.М. Мусин

« 13 » декабря 2021 года

Мусин Сергей Миргасович

Г.Москва, Энтузиастов проезд, д. 15.

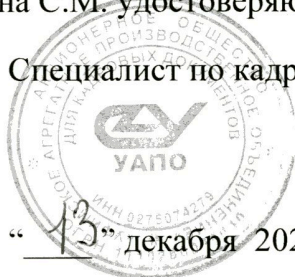
ОКБ АО «УАПО» (Обособленное конструкторское бюро Акционерного общества «Уфимское агрегатное производственное объединение»)

Тел. +7-495-627-10-99 доб. 3436

E.mail: smusin@tdhc.ru

Подпись официального оппонента доктора технических наук, профессора Мусина С.М. удостоверяю

Специалист по кадрам АО «УАПО»



« 13 » декабря 2021 года

Е.В. Харитонова