

## **ОТЗЫВ**

**официального оппонента**

**доктора технических наук, профессора Сиявского В.В.**

**на диссертационную работу**

**СКОРЛЫГИНА Владимира Владимировича**

**«Комплексный процесс управления жизненным циклом автономных ЯЭУ  
космического назначения»,**

**представленную на соискание учёной степени доктора технических наук  
по специальности 05.14.03 - ядерные энергетические установки, включая  
проектирование, эксплуатацию и вывод из эксплуатации**

### **Актуальность темы диссертации.**

Наша страна была и, в какой-то мере до сих пор остается мировым лидером в создании космических ЯЭУ с непосредственным (термоэлектрическим и термоэмиссионным) преобразованием тепловой энергии в электрическую. Были созданы и до конца 80-х годов на относительно низких орбитах успешно эксплуатировались КА УС-А с термоэлектрическими ЯЭУ «Бук». В составе двух экспериментальных КА «Плазма-А» на радиационно-безопасных орбитах в течение года были испытаны термоэмиссионные ЯЭУ «Топаз» электрической мощностью порядка 6 кВт. Практически полный цикл наземной отработки, включая ядерно-энергетические испытания, прошла термоэмиссионная ЯЭУ «Енисей», планировавшаяся в качестве источника электроэнергии КА непосредственного телевидения на бытовые антенны. Значительный объем проектно-конструкторских и экспериментально-испытательных работ был выполнен по космическим ЯЭУ по технологии «Топаз» электрической мощностью до 100 кВт для КА различного назначения и по ЯЭУ по новой литий-ниобиевой технологии субмегаваттной и мегаваттной электрической мощности для электроракетных межорбитальных буксиров.

Однако в 90-е годы из-за отсутствия бюджетного финансирования многие из этих программ были закрыты или велись в недостаточном объеме, требующие значительного финансирования испытательные работы, в том числе на реакторных базах, были прекращены, уникальные материаловедческие и экспериментально-испытательные базы были закрыты или морально устарели, до критического минимума сократился состав опытных и высококвалифицированных специалистов в области создания наиболее

эффективных космических ЯЭУ с термоэмиссионным преобразованием тепловой энергии в электрическую.

В то же время в последние годы после длительного перерыва наблюдается востребованность в космических ЯЭУ, позволяющих с повышенной относительно традиционных средств технико-экономической эффективностью решать ряд перспективных космических задач. Стратегия развития космической ядерной энергетики до 2030 г., утвержденная Указом Президента РФ №80 от 27.02.2019, определяет развитие космических ЯЭУ как актуальную задачу атомной и космической отраслей на ближайшее десятилетие. Поэтому попытка автора диссертации не только сохранить, но и обобщить с учетом современных реалий огромный отечественный задел по космическим ЯЭУ представляется оппоненту важной задачей, а тема диссертации, посвященной анализу накопленного опыта проектирования, производства, испытаний и эксплуатации космических ЯЭУ и исследованию возможных вариантов совершенствования процесса и улучшения координации разработки, сокращения сроков, снижения рисков утраты результатов, повышения ресурсной надежности в рамках комплексной задачи управления полным жизненным циклом космических ЯЭУ от технического задания до утилизации - актуальной.

**Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации.**

Научные положения, выводы и рекомендации, сформулированные в диссертации, обоснованы не противоречивостью основополагающим научным положениям, использованием в расчетных исследованиях верифицированных по результатам экспериментальных исследований на критических реакторных стендах и данных испытаний как с электронагревом, так и ядерно-энергетических испытаний полномасштабных макетов ЯЭУ «Енисей», в значительной степени экспериментальным характером исследований, в том числе реакторных, сравнением с результатами других авторов, в том числе по наземным испытаниям космической ЯЭУ «Топаз».

**Достоверность и новизна научных положений и выводов**

Диссертация обладает новизной и практической значимостью.

*Научная новизна диссертационной работы* заключается в следующем. В отечественной практике автором впервые рассмотрена задача комплексного анализа всего жизненного цикла ЯЭУ с учетом таких особенностей эксплуатации в космических условиях, как не обслуживаемость и не ремонтируемость в процессе завершающих стадий

жизненного цикла. Впервые сформулированы цели, задачи и концепция комплексной информационной модели построения системы управления техническим состоянием и безопасностью космических ЯЭУ. Разработан, верифицирован и использован при наземной отработке космической ЯЭУ «Енисей» ряд новых математических моделей динамических характеристик и безопасности термоэмиссионных ЯЭУ. Важную научную информацию имеют обобщенные в диссертации результаты ядерно-энергетических испытаний ЯЭУ «Енисей», в особенности пусковых режимов с учетом физико-технических ограничений и предложенных автором новых возможностей их преодоления.

**Достоверность** научных положений, выводов и рекомендаций обоснованы результатами многочисленных экспериментальных реакторных исследований, в том числе и ядерно-энергетическими испытаниями полномасштабных макетов ЯЭУ «Енисей», а также результатами расчетов процессов в ЯЭУ по верифицированным математическим моделям.

**Практическая значимость диссертации** заключается в реализации информационной и программной составляющих в единой комплексной информационной модели как эффективного инструмента решения важных задач управления жизненным циклом космических ЯЭУ, в том числе в задаче повышения надежности ЯЭУ как на этапе проектирования и разработки, так и на этапе эксплуатации, включая наземные испытания, а также в задаче анализа безопасности, экологической приемлемости и прогноза остаточного ресурса.

Отдельные результаты диссертации **использовались** при разработке программ-методик и анализе результатов исследований нейтронно-физических прототипов (критических сборок) ТРП, реакторных испытаний одноэлементных ЭГК, безядерных (с электронагревом) исследований полномасштабных макетов ЯЭУ «Енисей» (в ЦКБМ) и ядерно-энергетических испытаний ЯЭУ «Енисей», а также при разработке проектной документации по обоснованию ядерной безопасности и экологической приемлемости ЯЭУ «Енисей».

### **Оценка содержания диссертации и ее завершенности**

Диссертация В.В. Скорлыгина состоит из введения, шести глав, заключения, списка цитируемых литературных источников. Основной материал диссертации изложен на 335 страницах машинописного текста, включая 92 рисунка, 36 таблиц.

*Во введении* дается сводка основных положений диссертационной работы с обоснованием актуальности, новизны, практической значимости темы диссертации. Приводятся цели и задачи исследования.

*В первой главе* выполнен анализ опыта создания в СССР космических ЯЭУ первого поколения.

*Во второй главе* приведена концепция разработанной автором диссертации комплексной информационной модели как информационно-вычислительной системы, состоящей из базы данных, содержащей основные данные о ЯЭУ и об их изменениях на всех стадиях жизненного цикла, сведения о процессе отработки, контрольных операциях; а также программной надстройки для предсказания физических параметров ЯЭУ в эксплуатационных режимах.

*В третьей главе* излагаются методические результаты, полученные автором при создании системы математических моделей для исследования вопросов управления космическими ЯЭУ и оценок безопасности на разных этапах жизненного цикла. Приводятся данные верификации моделей по результатам специально поставленных экспериментов и наблюдавшихся при реакторных испытаниях аварийных режимов.

*Четвертая глава* посвящена оптимизации эксплуатационных режимов космической ЯЭУ. Подчеркивается, что оптимизация регламента эксплуатации является одним из важнейших способов увеличения ресурса КЯЭУ.

*Пятая глава* посвящена проблеме безопасности изготовления, испытаний и эксплуатации КЯЭУ. Анализируется влияние отличительных особенностей и технологической специфики ввода ЯЭУ в эксплуатацию на последовательность анализа безопасности.

*Шестая глава* содержит пример реализации технологий управления жизненным циклом космической ЯЭУ. Приводятся результаты экспериментов с использованием имитаторов ЯЭУ «Енисей», применявшихся для изучения динамических характеристик комплекса ЯЭУ в составе системы электропитания космического аппарата и возможности диагностики состояния ЯЭУ по данным телеметрии; экспериментальных исследований перспективных САУ в процессе испытаний опытных образцов ЯЭУ, испытаний системы автоматического управления во всех режимах работы без подключения к натурной ЯЭУ.

*В заключении* сформулированы основные выводы диссертационной работы.

Материал диссертации изложен последовательно и логично, диссертация написана грамотно с технической точки зрения и с точки зрения стиля изложения.

Содержание диссертации соответствует цели и поставленным задачам для ее реализации.

В целом диссертация является законченным научным трудом

### **Личный вклад.**

В диссертации представлены теоретические и экспериментальные результаты, полученные лично автором или под его непосредственным руководством, в том числе результаты научной разработки для всех представленных в диссертации математических моделей космической ЯЭУ «Енисей», а также термоэлектрической «Ромашка», для создания расчетных кодов и разделов штатного математического обеспечения; проведение расчетных исследований безопасности и эксплуатационной надежности ЯЭУ, для разработки программ-методик экспериментов и выполнения экспериментальных исследований.

### **Публикации.**

Основные результаты выполненных автором или с участием автора и изложенных в диссертации исследований *опубликованы* в 28 статьях и сборниках, в том числе *17 в журналах, рекомендованных ВАК по специальности 05.14.03.*

### **Замечания к диссертационной работе**

Прежде всего, оппонент считает необходимым отметить, что у него нет серьезных замечаний в части разработки, исследований и обобщения результатов создания и отработки космической термоэмиссионной ЯЭУ первого поколения «Енисей». Замечания касаются отсутствия в работе рекомендаций по управлению отдельными этапами жизненного цикла термоэмиссионных ЯЭУ следующего поколения с более высокими значениями электрической мощности и ресурса, а также повышенными требованиями к условиям первого и последующих запусков и длительной эксплуатации ЯЭУ в составе различных КА. Конкретно эти замечания следующие.

1 Цезиевые системы, предназначенные для обеспечения межэлектродных зазоров ЭГК паром цезия требуемого давления и одновременно удаления технологических газов и газообразных продуктов деления (ГПД) в космических термоэмиссионных ЯЭУ, являются одной из важнейших систем. В диссертации рассматривается расходомерная система, использованная в испытанных в космосе ЯЭУ «Топаз» и планируемая к использованию в ЯЭУ «Енисей» - с удалением в космос пара цезия вместе с ГПД. Такая система ограничивает ресурс ТРП запасом цезия, что и было продемонстрировано при полугодичных и почти годовых ЛКИ ЯЭУ «Топаз» в составе КА «Плазма-А». Кроме того, нельзя исключать и конденсацию пара цезия на поверхностях КА. Поэтому в настоящее время предложены и рассматриваются в термоэмиссионных ЯЭУ повышенной мощности и ресурса регенеративные цезиевые системы с разделением пара цезия от ГПД и возвратом прошедшего ТРП пара цезия в генератор пара цезия. Однако в диссертации при

анализе цезий-вакуумных систем эти прогрессивные решения не рассмотрены.

2 В пусковых режимах, достаточно подробно рассмотренных в диссертации, по мнению оппонента одним из важнейших является этап заполнения межэлектродных зазоров ЭГК паром цезия с постепенным повышением его давления. При этом необходимо не только тщательное проектирование цезий-вакуумного тракта, но и выполнение ряда важных ограничений при запуске как при наземных испытаниях, так и в космосе, связанных как с возможностью появления пробойных явлений при низком давлении пара, так и с возникновением так называемых «холодных точек» («ложных термостатов»). Подобные явления не только неоднократно приводили к прекращению реакторных испытаний ЭГК, но и к нештатной ситуации при последних перед ЛКИ наземных испытаниях ЯЭУ «Енисей». Однако в диссертации, несмотря на созданную автором матмодель цезиевого тракта с локальным отводом тепла, по мнению оппонента, рекомендациям по предотвращению появления таких нештатных ситуаций уделено недостаточно внимания.

3 В космических ЯЭУ первого, да и второго, поколения в качестве теплоносителя используется эвтектика NaK с температурой замерзания минус 11°С. Перед пуском РН с помощью стартовых электронагревателей температура теплоносителя поднимается до нескольких сот градусов, что обеспечивает отсутствие замерзания теплоносителя в течение примерно двух часов после старта. За это время должен быть осуществлен пуск ЯЭУ, хотя бы на промежуточную мощность. Продлить время пуска примерно до суток возможно с помощью термочехлов, сбрасываемых на целевой орбите, что и было предусмотрено для ЯЭУ «Енисей». Ограничение времени пуска и невозможность повторных пусков, а также повышенная вероятность потери дорогого КА, существенно снижают привлекательность использования ЯЭУ в качестве источника электроэнергии ряда перспективных КА. Проблема отсутствия ограничения по времени первого пуска и возможность многократных пусков и остановов решается наличием в ЯЭУ специальной пусковой системы, обеспечивающей плавление и последующий нагрев теплоносителя. Подобные системы на основе не замерзающего в условиях космоса теплоносителя в виде эвтектики NaKCs или на основе тепловых труб были предложены и отработаны. Однако, в диссертации, посвященной жизненному циклу космических ЯЭУ, такой важный с точки зрения эксплуатации вопрос об отсутствии ограничений по времени запуска ЯЭУ после пуска РН и возможности многократного пуска ЯЭУ не рассмотрен.

4 Работа автора посвящена комплексному процессу управления жизненным циклом космических ЯЭУ, одним из важнейших этапов которого являются работы с ЯЭУ (или КА с ЯЭУ) на космодроме. Применительно к ЯЭУ первого этапа на космодроме создавалась

специальная техническая позиция, где выполнялись работы, в частности, физпуск реактора, требующие высоко квалифицированных в области атомных установок специалистов, отчуждения территории, соблюдения требований ряда ПБЯ. В современных условиях проведение на космодроме ядерно-опасных операций крайне не желательно и скорее всего экономически не оправданно. Разработчики перспективных КА на базе ЯЭУ считают, что на космодроме не должно быть места таким операциям, а должны быть лишь традиционные для ракетно-космической отрасли операции типа проверки герметичности. прозвонки цепей и т.п. На космодром ЯЭУ (или КА с ЯЭУ) должны поставляться в полной готовности с гарантией завода-изготовителя надежной транспортировки. К сожалению, в диссертации отсутствует обсуждение этого важного для ракетно-космической отрасли вопроса.

Указанные замечания не снижают общей положительной оценки диссертации.

#### **Соответствие диссертации и автореферата критериям, установленным Положением о порядке присуждения ученых степеней**

Содержание диссертации соответствует паспорту специальности 05.14.03, а именно следующим пунктам:

П.2 Экспериментальные исследования в реакторных условиях и вне реакторов свойств и характеристик материалов, конструкций, оборудования и систем с целью выявления закономерностей их изменения в течение жизненного цикла объектов ядерной техники;

П.3 Разработка методов расчета технологических процессов в объектах ядерной техники с целью оптимизации их характеристик, повышения надежности оборудования и систем.

П.6. Разработка методов обоснования безопасности и экологической приемлемости технологий и объектов ядерной техники.

*Автореферат диссертации* в полной мере соответствует основным идеям, положениям, содержанию и выводам диссертации.

*Оценка диссертации в целом.* Представленная диссертационная работа В.В.Скорлыгина является законченным научным трудом и выполнена на хорошем научном уровне, по своему содержанию и форме, отвечает всем критериям п. 9 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 г. № 842 (редакция от 30.07.2014 г.). Автором развиты научные основы научного направления — создание комплексной системы управления жизненным циклом космических ЯЭУ, включая разработку методов инженерно-

технологической поддержки для принятия научно-технических решений, имеющих существенное значение для атомной и ракетно-космических отраслей. Считаю, что диссертация В.В.Скорлыгина удовлетворяет требованиям ВАК, предъявляемым к докторским диссертациям по специальности 05.14.03 – «Ядерные энергетические установки, включая проектирование, эксплуатацию и вывод из эксплуатации», а ее автор заслуживает присуждения ему ученой степени доктора технических наук.

**Официальный оппонент**

научный консультант службы организации научной деятельности ПАО «Ракетно-космическая корпорация «Энергия» имени С.П.Королева»,

доктор технических наук, профессор

*В.В. Сиявский*  
21.10.2021

**Синявский Виктор Васильевич**

141070 г. Королев Московской обл., ул. Ленина 4а  
Телефон 8(495)5137910, E-mail: viktor.sinyavsky@rsce.ru  
Докторская диссертация защищена оппонентом  
в ГНЦ РФ ФЭИ по специальности 05.14.03.

**Подпись д.тн, профессора В.В.Синявского заверяю.**

**Ученый секретарь, дф-мн**



**О.Н. Хатунцева**