

## **ОТЗЫВ**

**официального оппонента доктора технических наук, доцента,  
профессора кафедры «Плазменные энергетические установки»  
Онуфриева Валерия Валентиновича  
на диссертационную работу Попова Вячеслава Юрьевича  
«Обоснование прочностного ресурса космических тепловых  
энергетических установок», представленную на соискание ученой  
степени кандидата технических наук по специальности  
2.5.15. –Тепловые, электроракетные двигатели и  
энергоустановки летательных аппаратов**

### **Актуальность диссертационной работы**

Создание перспективных энергетических установок представляет собой очень сложный и трудоемкий процесс, поэтому любые работы, направленные на улучшение и повышение качества этого процесса, являются актуальными.

Решение задач, связанных с проектированием новых установок, на современном уровне развития науки и техники производится путем увеличения объема расчетных исследований, основанных на численном моделировании. Объем экспериментальных исследований, при этом, как наиболее дорогих и трудоемких работ, стараются свести к возможному минимуму, испытывая только финальные варианты конструкций, предварительно спроектированные с использованием расчетных исследований.

В связи с этим, вопросы разработки качественных и адекватных моделей, которые могут быть адаптированы к возможным изменениям параметров конструкции и режимов, крайне важны для оптимизации процесса проектирования. Учет вероятностной составляющей позволяет обоснованно снизить консервативность расчетных оценок без потери адекватности моделей, что может положительно сказаться как на итоговой массе конструкции, так и на принципиальной возможности обосновать некоторые конструктивные решения, обоснование которых на основе консервативных подходов является проблематичным или невозможным.

Отдел документационного  
обеспечения МАИ

12 12 2013

Это подчеркивает актуальность и важность диссертационной работы Попова В.Ю.

**Научная новизна** результатов диссертационной работы заключается в том, что:

- автором работы предложена и разработана методика прогнозирования и обоснования ресурса КТЭУ в условиях неопределенности информации путем введения и обоснования новых полуэмпирических кусочно-линейных аппроксимационных зависимостей для коэффициентов вариации действующих и допускаемых напряжений и функций релаксации напряжений в материале, что является ключевой проблемой при вероятностной оценке надежности;

- проведена комплексная оценка напряженно-деформированного состояния (НДС) исследуемых наиболее ответственных узлов и агрегатов КТЭУ и оценки их надежности в наиболее нагруженных режимах функционирования с использованием современных методов и подходов;

- получены новые результаты расчетно-экспериментального исследования наиболее важных узлов и агрегатов КТЭУ;

- разработана имитационная модель на основе комбинации классических и современных автоматизированных методов подготовки и расчета конечно-элементных моделей, которая позволяет оценивать прочность и механическую надежность элементов КТЭУ в реальном времени;

- предложен ряд технических решений, повышающих надежность КТЭУ, основанных на результатах проведенных расчетно-теоретических и экспериментальных исследований.

**Практическая значимость** результатов диссертационной работы заключается в том, что:

- разработанная методика прогнозирования и обоснования ресурса на основе оценки надежности в условиях недостаточности статистических

данных использована в АО «Красная Звезда» при проектировании КТЭУ нового поколения (*имеется акт о внедрении*).

Разработанная методика обоснования прочностного ресурса позволяет обосновать возможность создания КТЭУ с длительным ресурсом работы на этапе проектирования и уточнять расчетные оценки по мере получения новых данных, а также более детально оценить особенности и недостатки конструкции. Результаты диссертационной работы могут быть использованы при проектировании перспективных КТЭУ.

**Достоверность и степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций** диссертационной работы определяется:

1. Использованием теоретически обоснованных современных методик и математического аппарата исследования напряженно-деформированного состояния исследуемых агрегатов и расчетов с использованием современных программных комплексов.

2. Использованием расчетных и экспериментальных результатов создания КТЭУ 1-го поколения.

3. Использованием верифицированных и аттестованных программных комплексов для проведения численных экспериментов (верифицированного и аттестованного программного комплекса «CAE Fidesys» для проведения конечно-элементного анализа).

4. Хорошим совпадением результатов расчетно-теоретического и экспериментального исследования напряженно-деформированного состояния.

**Первая глава** диссертации посвящена анализу состояния вопроса обоснования длительного ресурса и существующим методикам. Обоснован выбор объекта исследования, сформулирован подход к исследованию, сформирована цель и задачи исследования.

**Вторая глава** диссертации посвящена разработке модели и методике расчета НДС наиболее важных элементов КТЭУ. Проведено численное исследование НДС. На основе разработанной методики прогнозирования и

обоснования ресурса КТЭУ в условиях неопределенности информации путем введения и обоснования новых полуэмпирических кусочно-линейных аппроксимационных зависимостей для коэффициентов вариации действующих и допускаемых напряжений и функций релаксации напряжений в материале получены зависимости времени релаксации напряжений для узлов и агрегатов.

**Третья глава** диссертации посвящена расчетно-экспериментальному исследованию динамики и прочности элементов КТЭУ. Расчет проведен на основе конечно-элементного моделирования. Приведены схемы экспериментальных стендов. Проведено сравнение результатов экспериментов и численного моделирования.

**Четвертая глава** диссертации посвящена обоснованию надежности и ресурса КТЭУ на основе полученных в предыдущих главах результатов расчетных и экспериментальных исследований. Благодаря интеграции прочностного пакета комплекса «Fidesys» и языка программирования «Python» автором диссертации создана имитационную цифровая модель – цифровой двойник КТЭУ, который позволяет оценивать прочность и механическую надежность элементов в режиме реального времени при проектировании.

**В заключении** приведены основные результаты работы.

**Диссертационная работа** изложена на 152 страницах и состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы и 3 приложений. Материал диссертации изложен логично и последовательно, хорошо структурирован, должным образом оформлен и проиллюстрирован.

Структура диссертации логично и четко отражает последовательность решения поставленных автором работы задач: анализ подходов и проблем, возникающих при проектировании подобных конструкций, выделение ключевых из них и определение способов их решения; исследование элементов, напряженно-деформированное состояние которых имеет определяющие значение, наиболее нагруженных режимов их

функционирования; определение событий отказов, составление графа отказов и схем надежности с последующим определением вероятности безотказной работы в условиях недостаточности исходной информации.

Диссертационная работа написана достаточно подробно и проиллюстрирована множеством схем, графиков и изображениями конечно-элементных моделей с результатов расчета напряженно-деформированного состояния. Оформление автореферата отвечает существующим требованиям, содержащийся в нём материал отличается целостностью и логичностью изложения. Содержание автореферата соответствует содержанию диссертации.

**Основные результаты** диссертационной работы достаточно полно опубликованы в изданиях, входящих в перечень ВАК(о чём свидетельствует приведённый список основных трудов по теме диссертации). Результаты работы опубликованы 9 печатных работ, в том числе 2 статьи, в изданиях, включенных в перечень ВАК, 1 статья в издании, индексируемом базой SCOPUS, 2 статьи в базе РИНЦ, 4 тезисов доклада. Результаты диссертационной работы докладывались на четырех всероссийских и одной международной конференциях, на одном межведомственном семинаре.

#### **Значимость результатов для науки и практики**

Автором разработана и реализована методика обоснования длительного прочностного ресурса на основе оценки прочностной надежности с использованием комбинации классических и современных автоматизированных методов подготовки и расчета конечно-элементных моделей, которые легли в основу имитационной модели.

На основании расчетных и экспериментальных исследований автором сформулированы обоснованные научные положения, предложены рекомендации по усовершенствованию элементов конструкции для снижения массы и повышения надежности, основанные на оценке надежности с учетом предложенных и обоснованных автором работы подходов к определению коэффициентов вариации. Среди значимых достижений автора следует

отметить предложенные подходы к выбору коэффициентов вариации напряжений, обоснованный выбор которых в условиях недостаточности статистических данных является весьма нетривиальной задачей.

Разработанная методика обоснования прочностного ресурса на основе оценки надежности в условиях недостаточности статистических данных позволяет обосновать возможность создания КТЭУ с длительным ресурсом работы на этапе проектирования и уточнять расчетные оценки по мере получения новых данных.

Практическая значимость для практики подтверждается актом о внедрении результатов работы, приведенным в приложении к диссертации. Результаты исследований имеют потенциал для применения при проектировании перспективных космических ТЭУ.

Важное научное и практическое значение приобретают полученные автором результаты расчетного исследования прочности и надежности элементов КТЭУ нового поколения, которые позволяют более детально оценить особенности и недостатки конструкции.

Заслуживает внимание изложенный автором подход к созданию геометрических и конечно-элементных моделей, который позволяет более эффективно создавать конечно-элементные модели высокого качества, что может повысить точность результатов численного моделирования.

Вместе с тем, по содержанию диссертационной работы можно сделать следующие **замечания**:

1. Для расчета процесса релаксации в работе используется уравнение установившейся ползучести в форме, предложенной С.А. Шестериковым и М.А. Юмашевой, однако не приведено обоснование и условия, по которым выбрана именно эта форма.

2. В работе приводятся результаты расчетов напряженно-деформированного состояния, выполненных методом конечных элементов, однако не во всех случаях указаны количественные параметры конечно-элементных моделей (число узлов, число элементов); не приводятся данные

об используемых вычислительных ресурсах и временных затратах, необходимых на выполнение расчетов.

3. Основная часть аналитических расчетов в работе выполнены в размерностях системы СИ, однако часть расчетов выполнены в технической системе – присутствуют размерности «кгс/см/с», что обосновано в ряде расчетов, но значительно затрудняет сквозной анализ работы; рекомендуется придерживаться одной системы единиц.

4. На рисунках 2.1.12, 2.1.15, 2.1.21 раздела 2 отмечены зоны, в которых возникают напряжения с максимальными значениями, однако увеличенных изображений этих областей не приводится, что затрудняет анализ напряженно-деформированного состояния этих участков элементов исследуемой конструкции.

5. На рисунке 2.6.2 раздела 2 приведены буквенные обозначения длин балок системы развертывания, однако числовые значения для данных величин далее не приводятся;

6. На рисунках 3.3.4 и 3.3.5 раздела 3 приводятся по три графика разного цвета, однако на обоих рисунках не указано, какой из графиков чему соответствует, что затрудняет их анализ.

Указанные замечания не снижают достоинств и положительной оценки представленной диссертационной работы, однако автору рекомендуется их учесть при выполнении исследований в будущем.

### **Заключение по диссертации**

Диссертационная работа Попова Вячеслава Юрьевича «Обоснование прочностного ресурса космических тепловых энергетических установок» представляет собой законченную научно-квалификационную работу, в которой изложены новые научно обоснованные результаты, имеющие важное научно-практическое значение при разработке космических тепловых энергетических установок.

Работа соответствует паспорту специальности 2.5.15. – «Тепловые, электроракетные двигатели и энергетические установки летательных аппаратов» и удовлетворяет требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени кандидата наук «Положением о присуждении учёных степеней», а ее автор Попов Вячеслав Юрьевич, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.5.15. – «Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов».

Официальный оппонент, д.т.н.,  
доцент, профессор кафедры «Плазменные  
энергетические установки» ФГБОУ ВО  
«Московский государственный  
технический университет имени Н.Э.  
Баумана (национальный исследовательский  
университет)», главный научный сотрудник  
Научно-исследовательского института  
«Энергомашиностроение» МГТУ имени  
Н.Э. Баумана



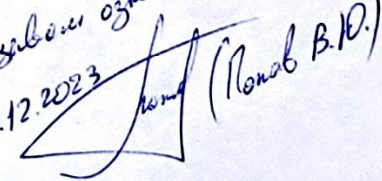
Онуфриев Валерий  
Валентинович

«11» декабря 2023 г.

Адрес: 105005, Москва, 2-я  
Бауманская ул., д. 5, стр. 1.  
ФГБОУ ВО «Московский  
государственный технический  
университет имени Н.Э. Баумана  
(национальный исследовательский  
университет)»  
Телефон: +7 (499)263-63-89  
E-mail: [onufryev@bmstu.ru](mailto:onufryev@bmstu.ru)




263-60-48

С ответом ознакомлен  
12.12.2023  
 (Попов В.Ю.)

Подпись Онуфриева Валерия Валентиновича заверяю.