

*На правах рукописи*



ПОПОВ ВЯЧЕСЛАВ ЮРЬЕВИЧ

**ОБОСНОВАНИЕ ПРОЧНОСТНОГО РЕСУРСА КОСМИЧЕСКИХ  
ТЕПЛОВЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК**

2.5.15. – Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных  
аппаратов

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени

кандидата технических наук

Москва – 2023

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» на кафедре 203 «Конструкция и проектирование двигателей» института №2 «Авиационные, ракетные двигатели и энергетические установки»

Научный руководитель: **Демидов Анатолий Семенович**, доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Никитин Илья Степанович**, доктор физико-математических наук, профессор, ФГБУН «Института автоматизации проектирования РАН», директор

**Онуфриев Валерий Валентинович**, доктор технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)», профессор кафедры «Плазменные энергетические установки»

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ»

Защита диссертации состоится 28 декабря 2023 года в 13 часов 00 мин. на заседании диссертационного совета 24.2.327.06, созданного на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» по адресу 125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, д.4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)»

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2023 г.

Учёный секретарь  
диссертационного совета 24.2.327.06  
доктор технических наук, доцент



Краев Вячеслав Михайлович

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** Использование источников энергии, в том числе тепловых энергоустановок (ТЭУ) на основе теплообменных аппаратов (ТА), является наиболее перспективным для применения при длительных космических полетах, для энергоснабжения обитаемых станций и баз, в т.ч. на Луне и Марсе, а также для питания космических аппаратов, которые потребляют большие мощности длительное время и, при этом, не должны зависеть от положения относительно солнца и снижения мощности в результате изменения положения на орбите или деградации источника питания, как это происходит с солнечными батареями.

Рассматриваемые в настоящей работе ТЭУ имеют преимущества по отношению к источникам энергии другого типа, главными из которых являются относительно малая масса и компактность, при большой удельной мощности. На современном этапе развития исследований космоса создание ТЭУ повышенной мощности – от 50 до 200 кВт, с длительными ресурсами функционирования, порядка 5-10 лет и более, а также ТЭУ мегаваттного класса (более 500 кВт) является важной задачей. Разрабатывавшиеся космические тепловые энергетические установки «Бук» и «Топаз» обеспечивали электрические мощности 3 и 5 кВт и ресурс не более года. Последний запуск на орбиту подобной установки был произведен в 1987 году.

**Цель работы** заключается в разработке методики расчетно-теоретического обоснования длительного прочностного ресурса космических тепловых энергетических установок (КТЭУ).

**Объектом исследования** является космическая ТЭУ нового поколения разработки АО «Красная Звезда».

**Основными задачами** работы являются:

- 1) Анализ особенностей проектирования и эксплуатации КТЭУ нового поколения.
- 2) Учет комплекса воздействий на рабочем, а также пусковом и завершающем режимах эксплуатации КТЭУ.

3) Исследование структурных элементов КТЭУ, напряженно-деформированное состояние (НДС) или геометрическое положение которых может существенно повлиять на функционирование КТЭУ вплоть до досрочного прекращения функционирования.

4) Обоснование конструктивных решений, позволяющих обеспечить длительный ресурс работы КТЭУ.

5) Количественная оценка механической надежности важнейших узлов КТЭУ и всей установки в целом.

**Научная новизна** работы состоит в следующем:

1. Проведена комплексная оценка НДС и надежности наиболее ответственных агрегатов КТЭУ (ТА, силовой проставки и рамы, шпангоутов и их элементов, системы разворачивания (СР) а также элементов жидкометаллического контура (ЖМК)) на наиболее нагруженных квазирежимах эксплуатации с использованием современных подходов, расширенных предложениями автора работы.

2. Разработана методика расчетно-теоретического обоснования ресурса КТЭУ нового поколения на основе определения надежности в условиях недостаточности исходных данных и обоснована возможность достижения требуемого ресурса для данного класса установок.

3. Предложен ряд технических решений, повышающих надежность установки, основанных на результатах проведенных исследований.

4. Выполнены расчетно-экспериментальные исследования компенсационного бака (КБ) с сифонами при циклическом нагружении, макета органа регулирования (ОР) при его “сбросе”, макетах регулирующего стержня (РС) и его канала, а также сравнение расчетных результатов с экспериментом для ТА.

**Практическая ценность.**

Разработанная методика обоснования ресурса КТЭУ использована в АО «Красная Звезда» при проектировании КТЭУ нового поколения (имеется акт о внедрении).

**Достоверность и обоснованность** полученных в работе результатов определяется:

1. Использованием теоретически обоснованных методик исследования НДС и расчетов.

2. Привлечением опыта создания КТЭУ 1-го поколения «Бук» и «ТОПАЗ».
3. Использованием верифицированных и аттестованных программных средств для проведения численных экспериментов.
4. Экспериментальной проверкой полученных результатов расчета НДС.

**Личный вклад соискателя.** Все расчетные, и ряд экспериментальных исследований, изложенных в диссертационной работе, проведены лично соискателем, результаты исследований представлены в статьях в журналах, реферируемых ВАК и индексируемых SCOPUS.

**Апробация работы.** Основные положения работы, результаты теоретических и расчетных исследований докладывались и обсуждались на:

1. 7-й российской конференции «Методы и программное обеспечение расчетов на прочность» (Геленджик 2012 г.);
2. 8-й российской конференции «Методы и программное обеспечение расчетов на прочность» (Геленджик 2014 г.);
3. 24-й всероссийской конференции «Численные методы решения задач теории упругости и пластичности» (Омск 2015 г.);
4. 18-й международной конференция «Авиация и космонавтика - 2019» (Москва 2019 г.);
5. заседаниях НТС АО «Красная Звезда».

**Положения, выносимые на защиту:**

1. Методика определения элементов КТЭУ, подлежащих расчетным исследованиям, на основе анализа режимов и структурной схемы установки.
2. Результаты расчетных исследований НДС и надежности наиболее ответственных с точки зрения прочности элементов КТЭУ.
3. Методика и результаты расчетно-экспериментальных исследований, выполненных для подтверждения подходов к обоснованию НДС и надежности.
4. Методика и результаты обоснования длительного ресурса КТЭУ на этапе проектирования на основе оценки надежности элементов КТЭУ в условиях недостаточности статистических данных.

## Публикации.

Материалы, отражающие содержание диссертационной работы и полученные в ходе ее выполнения, представлены в 9-и публикациях, в том числе в 2-х открытых статьях в реферируемых ВАК РФ журналах и 1-й статье в журнале, индексируемом SCOPUS.

## Структура и объем работы.

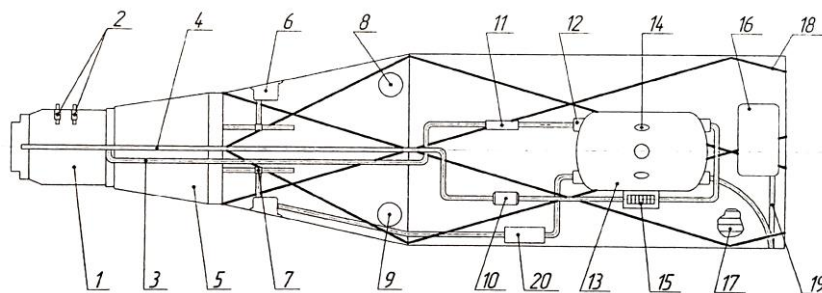
Диссертационная работа изложена на 152-х листах и состоит из введения, 4-х глав, заключения, списка литературы и 3-х приложений. Список литературы содержит 56 наименований.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении показана актуальность темы диссертации, сформулированы цели и задачи исследования.

В первой главе рассматривается общее состояние проблемы проектирования космических тепловых энергоустановок нового поколения. Отмечается, что для установок нового поколения характерны длительные ресурсы эксплуатации и повышенные мощности, а также большие габаритные размеры и, как следствие, необходимы сложные конструктивные решения для обеспечения соответствующих параметров.

Для сравнения на рисунке 1.1 и 1.2 приведена схема КТЭУ 1-го поколения «БУК» и общий вид КТЭУ «ТОПАЗ», на рисунке 1.3 и 1.4 схема КТЭУ нового поколения.

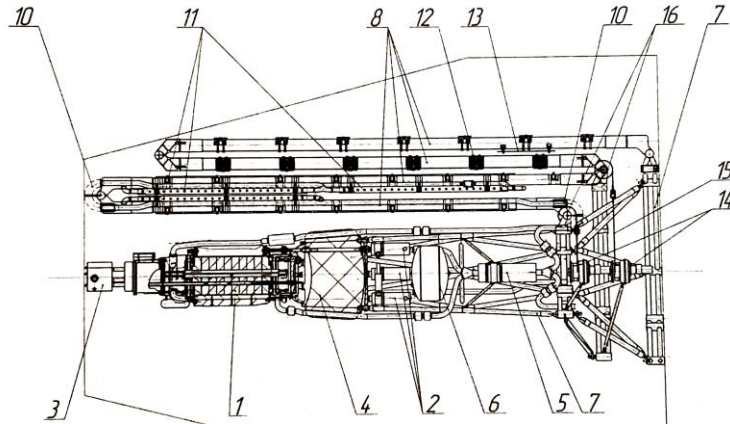


1 – теплообменник; 2 – датчики потоков частиц; 3 – выходной трубопровод реактора; 4 – входной трубопровод реактора; 5 – узел защиты; 6 – привод управляющих стержней; 7 – шестерня и рейка; 8, 9 – компенсационные баки; 10 – горячая ловушка; 11 – стартовый нагреватель; 12 – сильфонный узел; 13 – термоэлектрогенератор; 14 – токовыводы; 15 – электромагнитный насос; 16 – пусковой блок; 17 – холодильник-излучатель (ХИ); 18 – рама ХИ; 19 – выходной коллектор ХИ; 20 – балластное сопротивление

Рисунок 1.1 – Схема системы агрегатов КТЭУ 1-го поколения – «БУК»

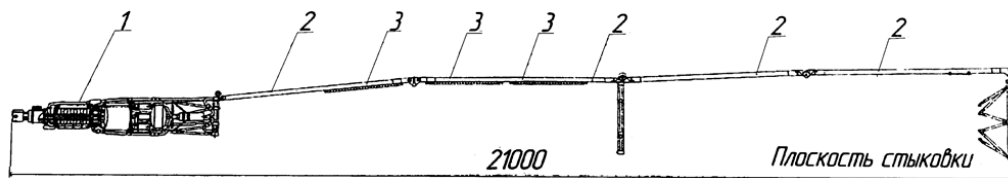


Рисунок 1.2 – Общий вид КТЭУ 1-го поколения – «ТОПАЗ»



1 – ТА; 2 – ОР; 3 – цезиевая система; 4 – ЗТ; 5 – электромагнитный насос; 6 – КБ; 7 – рама силовая; 8,9 – ветви СР; 10 – шарнирно-сильфонные узлы; 11 – ХИ; 12 – хомуты; 13 – панели; 14 – привод СР; 15 – шпангоут СР; 16 – шарниры СР

Рисунок 1.3 – Схема КТЭУ нового поколения в стартовом положении



1 – теплообменник; 2 – силовые элементы (балки); 3 – панели холодильника-излучателя

Рисунок 1.4 – Схема КТЭУ нового поколения в орбитальном положении

Для установок нового поколения не решенным оставался ряд задач, связанных с обеспечением прочности на основных эксплуатационных квазирежимах при длительных ресурсах, действии перегрузок на режиме выведения и режиме глушения, а также надежности с учетом требуемого ресурса.

При нахождении материала под долговременным высокотемпературным воздействием его предел длительной статической прочности снижается и возникает необходимость обоснования длительной прочности рассчитываемых элементов с учетом этого снижения, учитывая также и релаксацию.

Дополнительные сложности возникают при попытке учесть влияние факторов,

определяющих разброс значений нагрузок и свойств материалов на протяжении ресурса, ведь в общем случае эти величины являются случайными. На практике соотношение кривых релаксации и длительной прочности может иметь вид, представленный на рисунке 1.5, где у каждой кривой присутствует зона возможного разброса значений.

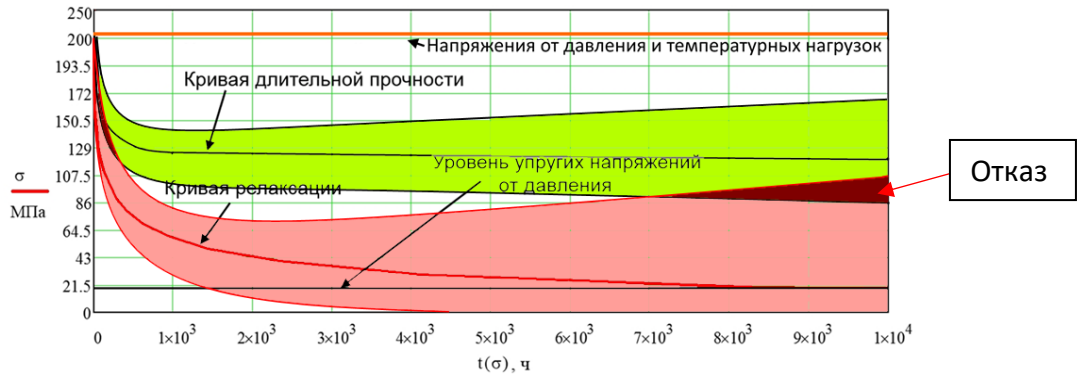
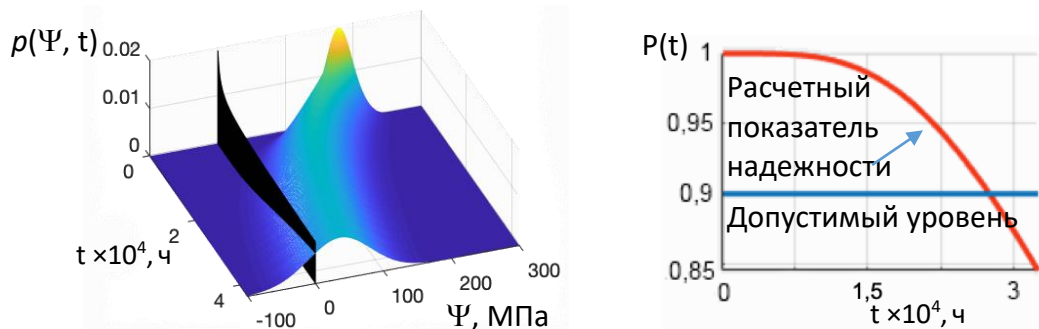


Рисунок 1.5 – Соотношение кривых с учетом разброса значений

На основе расчетных данных можно построить функцию плотности вероятности по времени  $p(\Psi, t)$  с учетом изменения ее параметров (рисунок 1.6а) и функцию изменения вероятности безотказной работы с течением времени (рисунок 1.6б).



а) функция плотности вероятности  $p(\Psi, t)$ , б) функция показателя надежности  $P(t)$

Рисунок 1.6 – Примеры

В связи с чем встает необходимость определения характеристик случайных величин и исследования с их помощью надежности конструкции с учетом известного требуемого ресурса. Главным образом требуется определить коэффициенты вариации для действующих и допускаемых напряжений  $\nu_R$  и  $\nu_F$ , что является ключевой проблемой при вероятностной оценке надежности.

В работе предлагается использовать коэффициент вариации для допускаемых напряжений



$$\nu_R = 0,1 + 0,05 = 0,15. \quad (1.1)$$

в качестве слагаемых в который входят коэффициент вариации для сварных соединений, согласно справочным источникам:  $\nu_{св} = 0,05$  и  $\nu_{мат}$  из ГОСТ 25.504 «Расчеты и испытания на прочность. Методы ... усталости.», предлагающий значение коэффициента вариации свойств материала  $\nu_{мат} = 0,1$ .

Для определения коэффициента  $\nu_F$  в работе предлагается ряд подходов, например, проводить верификационные исследования, откуда можно будет получить искомый коэффициент. В частности, по результатам верификации CAE Fidesys, был формально обоснован  $\nu_F = 0,05$ . Также возможно использовать подход, когда выбирается элемент конструкции и после обработки результатов исследования сеточной сходимости вычисляется выборочное среднее значение, которое принимается за математическое ожидание

$$\langle F \rangle = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sigma_i \quad (1.2)$$

затем выборочная (несмещенная) дисперсия как

$$D_F = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\sigma_i - \langle F \rangle)^2, \quad (1.3)$$

и определяется  $\sigma_F^2 = D_F$ . Откуда:

$$\nu_F = \sqrt{\sigma_F^2 / \langle F \rangle^2}. \quad (1.4)$$

Также рассматривается и ряд других вариантов. При невозможности получить данные для  $\nu_F$  иным путем такие подходы являются вполне обоснованным и допустимым.

Далее, на основе предварительных исследований определялись структурные элементы КТЭУ, напряженно-деформированное состояние или геометрическое положение которых влияет на функционирование ТЭУ нового поколения и которые определяли вид структурной схемы прочностной надежности.

### **Во второй главе**

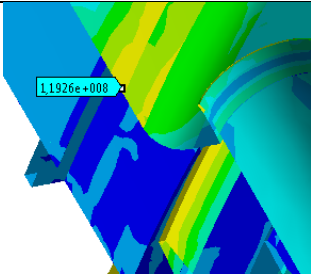
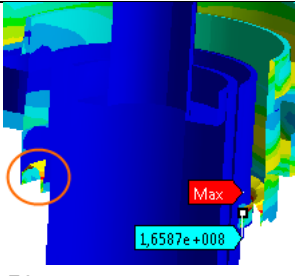
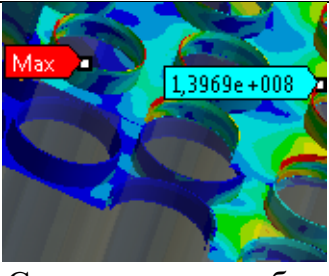
Приводятся результаты исследований прочности выбранных элементов ТЭУ нового поколения, выявляются проблемные места, рекомендуются конструктивные

способы решения противоречий или уточняются расчетные методики, что позволяет обосновать прочность конструкции без существенной переработки.

Расчеты проводятся с учетом нелинейности диаграммы деформирования с использованием аппроксимации билинейными кривыми.

Для наиболее напряженных элементов конструкции, в частности элементов ТА (таблица 2.1) исследуется релаксация напряжений на протяжении ресурса и сопоставляется с изменением предела длительной статической прочности – рисунок 2.2.

Таблица 2.1 – Элементы с наибольшими напряжениями

Элемент			
	Обечайка внутреннего «стакана» ТА	Компенсатор канала регулирующего стержня	Сварные швы трубок теплообменного аппарата
Т, °С	595	575	496
Расчетные напр., МПа	119,26	165,87	139,69
Напряжения от давления, МПа	21,4	54,9	29,7

Для расчета процесса релаксации использовано уравнение установившейся ползучести в форме, предложенной С.А.Шестериковым и М.А.Юмашевой:

$$\dot{\varepsilon}_{пол} = A^T \left( \frac{\sigma}{\sigma_{см}^T - \sigma} \right)^{n^T} \quad (2.1)$$

Преобразуя соотношение (4.1) можно получить уравнение релаксации:

$$t(\sigma) = -\frac{1}{A^T E_1^T} \int_{\sigma_0}^{\sigma} \left( \frac{\sigma_{см}^T - \sigma}{\sigma} \right)^{n^T} d\sigma \quad (2.2)$$

Температуры наиболее напряженных элементов конструкции составляют от 500 °С до 600 °С.

В качестве коэффициентов  $A^T$  и  $n^T$  для 600 °С использовались коэффициенты  $A^{600} = 2,0725 \times 10^{-6}$ ,  $n^{600} = 2,238$  и  $A^{550} = 2,746 \times 10^{-7}$ ,  $n^{550} = 2,432$  для 550 °С, полученные в результате обработки результатов испытаний на ползучесть стали 08Х16М11НЗ.

Для температуры 575 °С проводился расчет с коэффициентами  $A^{550}$ ,  $n^{550}$ , т.к. они определяют более низкую скорость релаксации, чем при  $A^{600}$ ,  $n^{600}$ .

Т.к. среди элементов в таблице 2.1 присутствует элемент с температурой близкой к 500 °С, для которой коэффициенты  $A^{500}$  и  $n^{500}$  отсутствуют, но имеются коэффициенты  $A^{650}$  и  $n^{650}$  для 650 °С, значения  $A^{500}$  и  $n^{500}$ , определялись экстраполяцией кривых, построенных по точкам  $[A^{650} A^{600} A^{550}]$  и  $[n^{650} n^{600} n^{550}]$  с учетом «характера их поведения» - изменения угла наклона кривых относительно друг друга.

На рисунке 2.1 приведены кривые, построенные по точкам с имеющимися и искомыми значениями коэффициентов. Далее полученные коэффициенты подставляются в уравнение 2.2 и получается семейство кривых, представленных на рисунке 2.2.

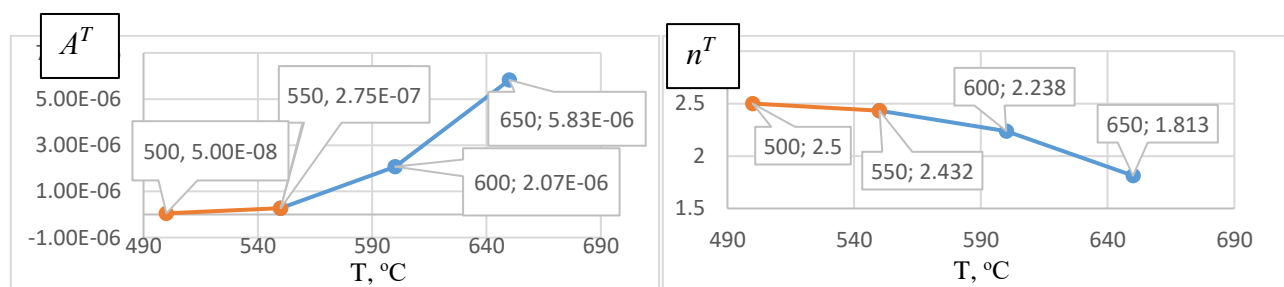


Рисунок 2.1 – Кривая коэффициентов  $A^T$  и коэффициентов  $n^T$

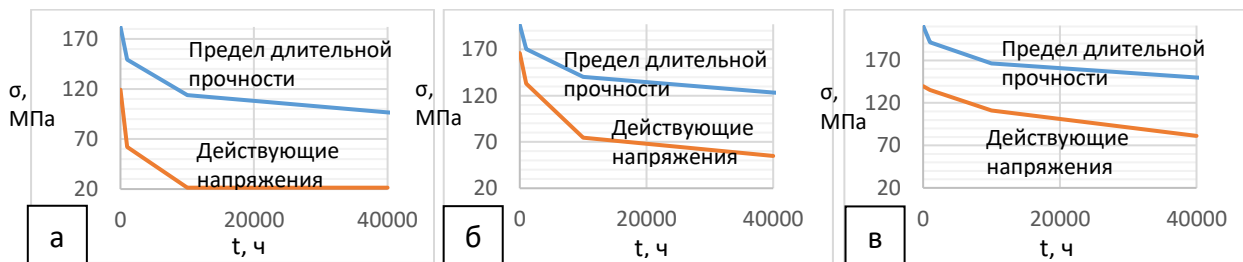


Рисунок 2.2 – Кусочно-линейные функции релаксации напряжений и длительной прочности для цилиндрической обечайки внутреннего «стакана» ТА (а), компенсатора канала регулирующего стержня (б) и сварных швов трубок ТА (в)

Далее исследовалось НДС силовых элементов, таких как силовая рама, проставка между ТА и тепловой защитой, шпангоута СР, а также системы разворачивания, элементов ЖМК и КБ (рисунки 2.3 и 2.4), а также НДС ряда других элементов, на основе которых должна быть проведена оценка надежности.

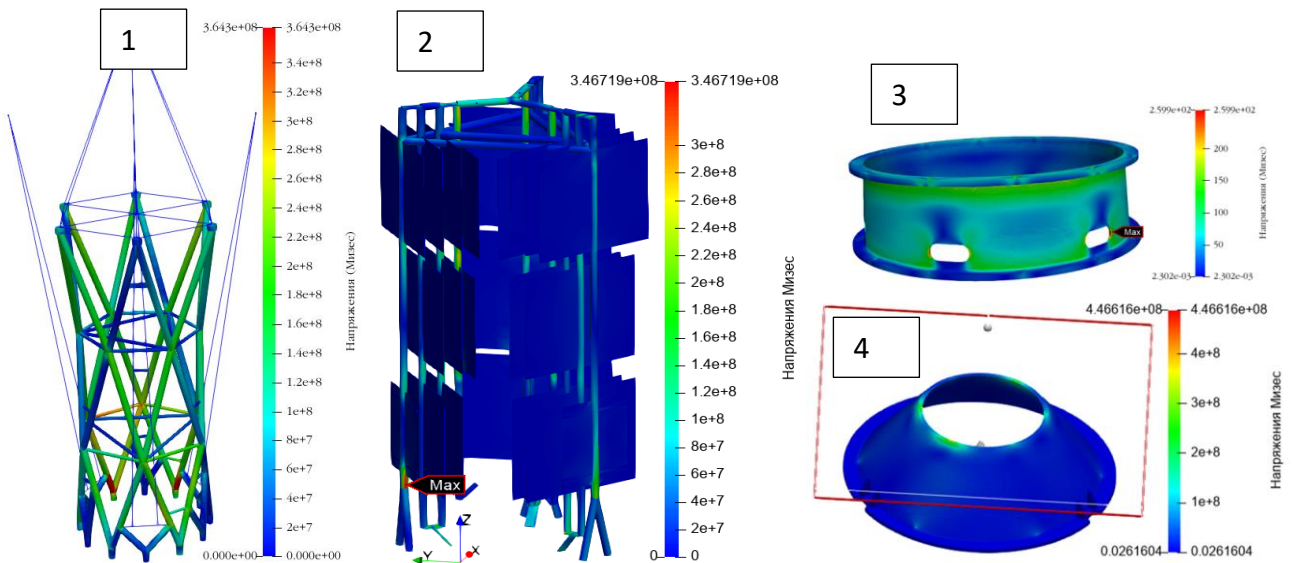


Рисунок 2.3 – НДС силовой рамы (1), системы разворачивания (2), проставки (3) и шпангоута системы разворачивания (4). Напряжения в Па

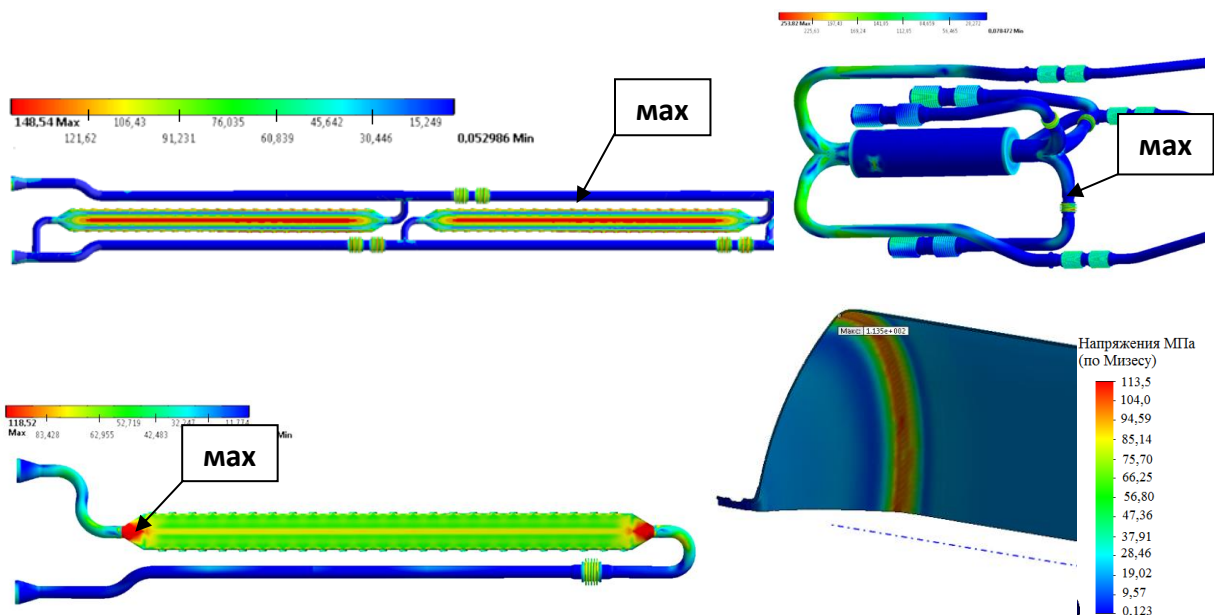


Рисунок 2.4 – НДС элементов жидкометаллического контура и корпуса компенсационного бака (в МПа)

**В третьей главе** приводятся результаты расчетно-экспериментальных исследований, в частности:

- проверка подхода к расчету ТА с трубным пакетом методом конечных элементов на основе эксперимента;

- исследования прочности кинематической цепи органов регулирования тепловой мощности (ОР) теплообменника ТЭУ нового поколения в момент срабатывания (т.н. «сброса») под действием пружин сброса в момент глушения установки;

- исследования условий работы и заклинивания регулирующего стержня при прохождении внутри канала в момент глушения установки;

- исследования циклической прочности сильфонов компенсационного бака.

На рисунке 3.1а и 3.1б представлена экспериментальная установка. На рисунке 3.1в представлен результат расчета в увеличенном масштабе. Сравнение результатов расчета и экспериментальных данных приведено на рисунке 3.1г.

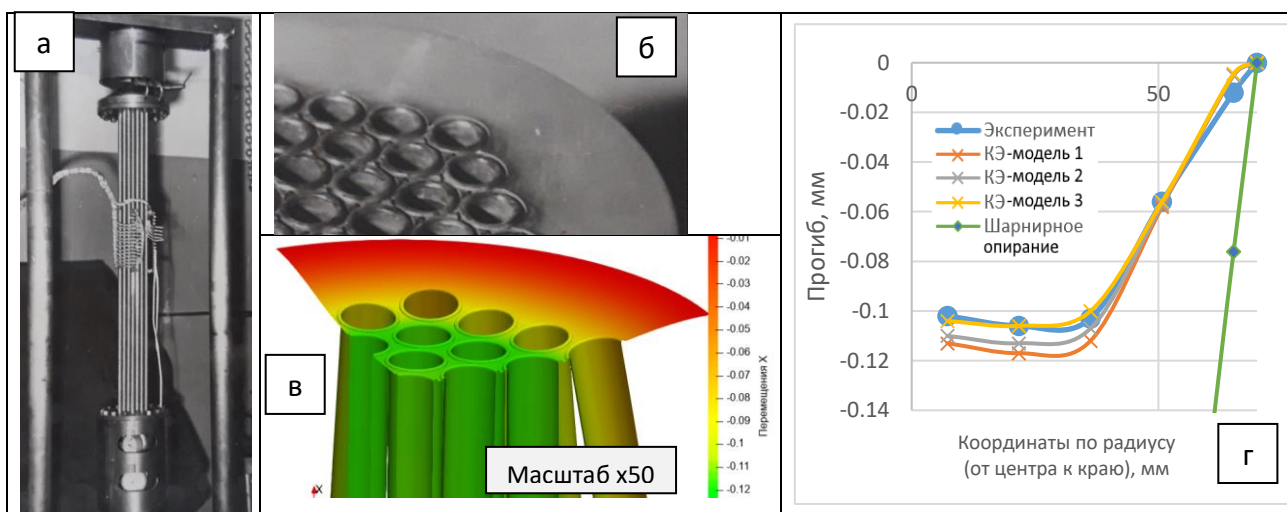


Рисунок 3.1 – Экспериментальная установка (а, б), результаты расчета (в) и сравнение результатов расчета с результатами эксперимента (г)

На рисунке 3.2 представлена экспериментальная установка для исследования динамики и прочности элементов системы органов регулирования. На рисунке 3.3а кинематическая схема ОР. На рисунке 3.3б приведены зависимости угла поворота цилиндров при «сбросе» с различных начальных положений.

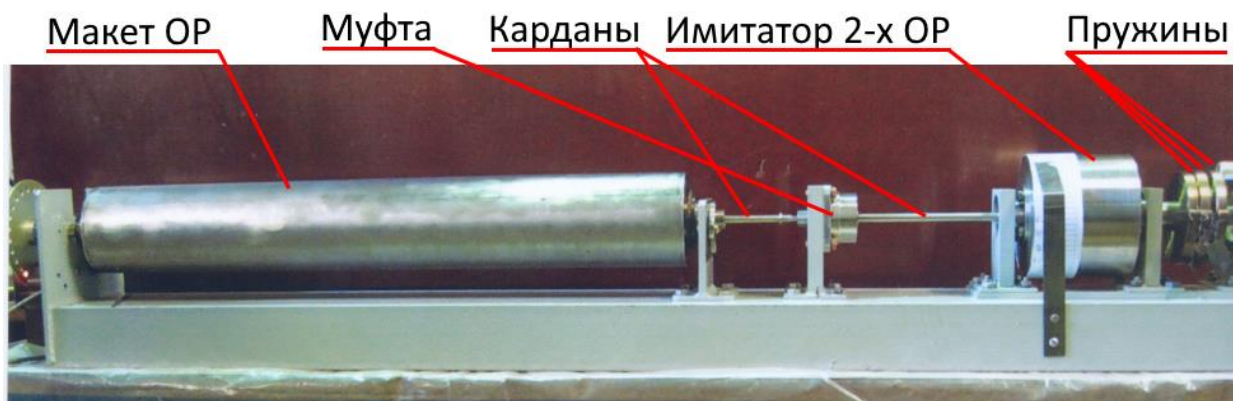
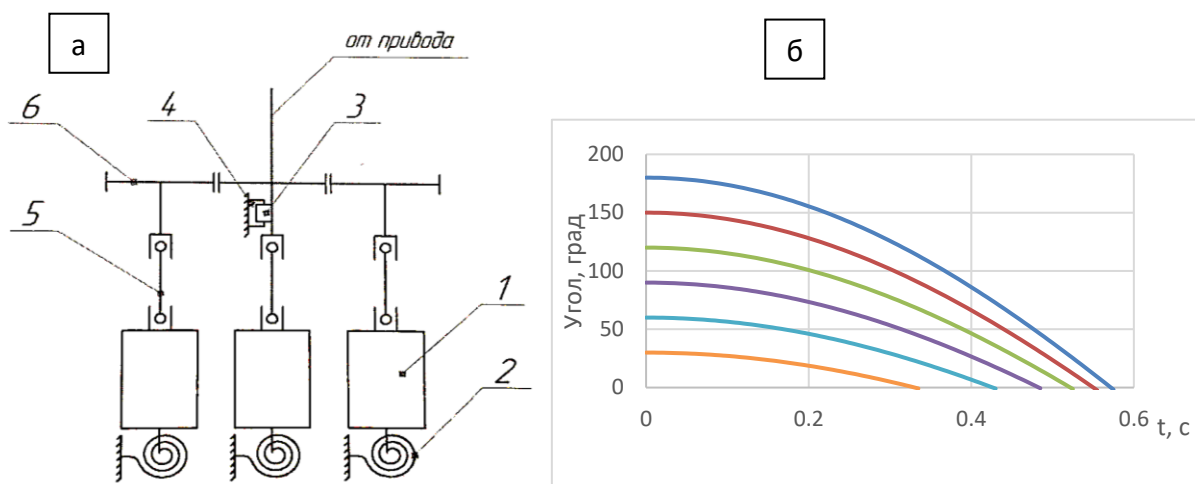


Рисунок 3.2 – Экспериментальная установка для исследования динамики «сброса» органов регулирования



1 – ОР; 2 – пружина антилюфтовая; 3 – упор на валу; 4 – упор в корпусе; 5 – кардан; 6 – механизм распределительный

Рисунок 3.3 – Кинематическая схема группы ОР (а) и зависимость угла поворота цилиндра при «сбросе» с начальных положений от 30° до 180° от времени (б)

Результаты аналитических расчетов показывают возможность «сбросить» ОР за требуемый промежуток времени при условии обеспечения прочности всех элементов кинематической цепи ОР.

При контакте кулачка механизма ОР со стопорным упором его среза не происходит, что подтверждается результатами конечно-элементных (КЭ) расчётов и результатами экспериментов (рисунок 3.4).

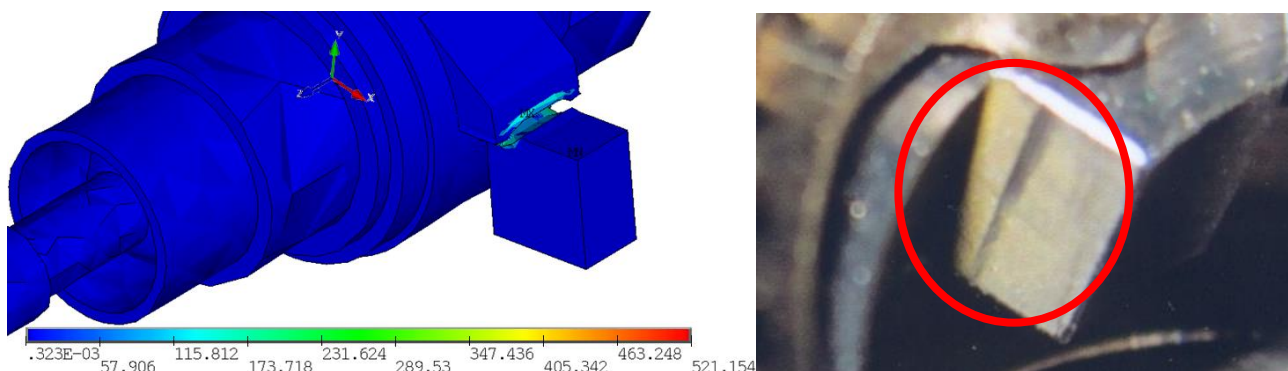


Рисунок 3.4 – Результаты КЭ-расчета (в увеличенном масштабе) и эксперимент (выделена «риска» на упоре, образовавшаяся после соударения с ним кулачка)

На рисунке 3.5а приведена схема расположения канала рег.стержня внутри установки. На рисунке 3.5б – деформированное состояние канала в увеличенном масштабе, полученное по результатам конечно-элементного расчета.

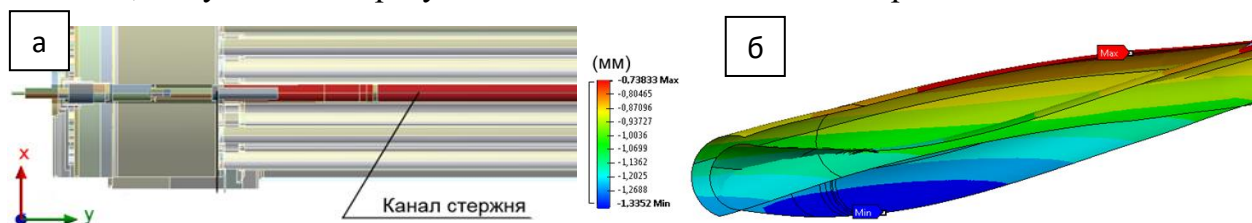


Рисунок 3.5 – Канал регулирующего стержня в конструкции ТА (а) и деформированное состояние канала в масштабе 500:1 (б) (цветовая схема перемещений - по оси X)

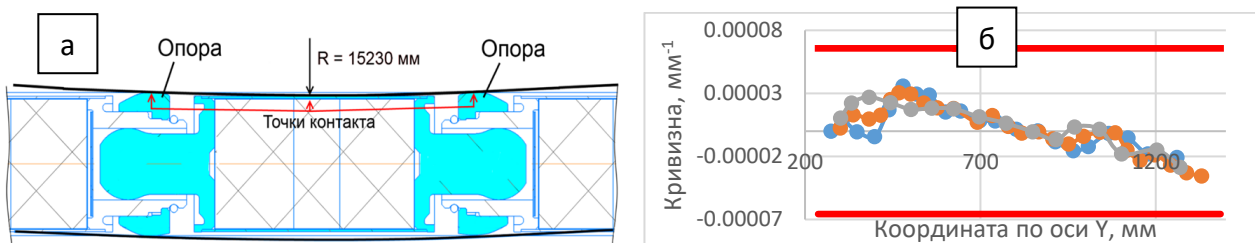


Рисунок 3.6 – Схема заклинивания механизма регулирующего стержня (а) и средняя кривизна дуги (б)

Используя данные рисунка 3.5б, была определена средняя кривизна дуги образующих канала (рисунок 3.6б) путем вычисления отношения приращения угла к приращению горизонтальной координаты. Границы допустимой кривизны  $K = \pm 6,56 \cdot 10^{-5} \text{ мм}^{-1}$  определялись как обратная величина радиусу кривизны дуги  $R = 15230 \text{ мм}$ , представленной на рисунке 3.6а и соответствующей заклиниванию.

Для проверки исходных предположений об условиях заклинивания регулирующего стержня был проведен эксперимент. На рисунке 3.7б показаны результаты предварительного обчета эксперимента. На рисунке 3.7а – экспериментальная установка с заданными перемещениями середины трубы величиной в 7 мм и часовым индикатором перемещений. Результаты эксперимента – рисунок 3.8.

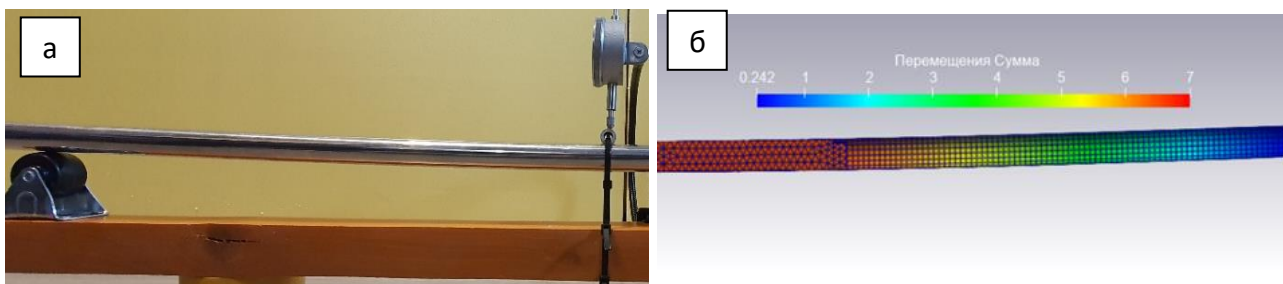


Рисунок 3.7 – Прогиб 7 мм. Зазор закрыт. Экспериментальная установка под нагрузкой (а) и результаты расчета (б)

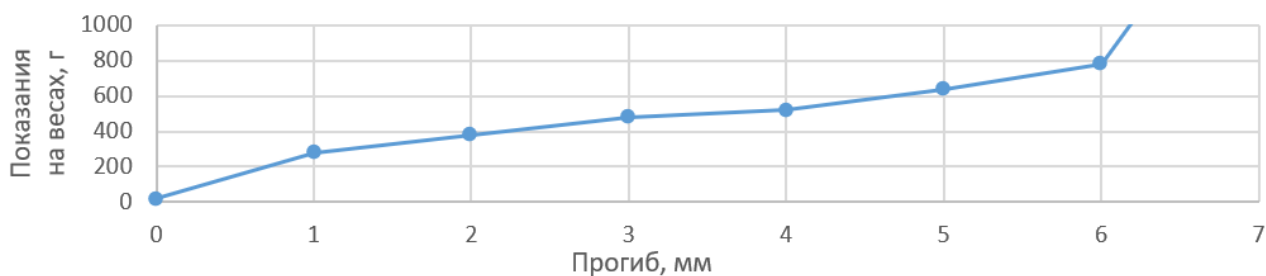


Рисунок 3.8 – Результаты эксперимента

Проведенные измерения усилия (рисунок 3.8), возникающего при протяжке тросом имитатора регулирующего стержня через канал, показали рост его величины при увеличении прогиба, что связано с искривлением формы имитатора канала. В связи с этим увеличивалось давление стенок на опорные зоны имитатора стержня и соответственно росла сила трения (замеры проводились динамометрическими весами). Имитатор стержня был изготовлен методом FDM 3D-печати из PLA пластика, а в качестве имитатора канала использовалась труба из нержавеющей стали. Коэффициент трения данной пары, согласно справочникам, лежит в диапазоне 0.2 - 0.25.

При достижении величины прогиба в 7 мм произошел резкий рост усилия, существенно выходящий за пределы измерительных возможностей динамометрических весов. В результате попыток протянуть имитатор стержня через



канал силовым путем трос был порван и было констатировано заклинивание стержня в канале, что подтвердило исходное предположение.

На рисунке 3.9 представлена экспериментальная установка для проверки циклической прочности сифонов компенсационного бака. Колебания сифонов создавались с помощью электродвигателя в кинематической цепи, воздействующего на шток гидравлического инжектора. Число циклов колебаний сифонов доводилось до 200 000 (при симметричном цикле), после чего бак разрезался и проводилось исследование состояния сифонов. Результаты эксперимента подтвердили достижение требуемого уровня надежности.



Рисунок 3.9 – Испытательная установка

**В четвертой главе** приводится расчетная оценка надежности элементов конструкции ТЭУ на основе результатов исследований НДС с учетом определенных по разработанной методике коэффициентов вариации для определения прочностной надежности системы в целом.

Рассматривались три отдельных этапа жизненного цикла установки – режим выведения на орбиту, рабочий режим и режим глушения. Для каждого из этапов определяется механическая надежность.

Структурная схема механической надежности представлена на рисунке 4.1. Схема представляет из себя структуру из последовательно соединенных элементов (блоков элементов), математическая модель надежности которой описывается формулой (4.1)

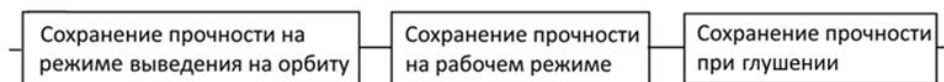


Рисунок 4.1 – Структурная схема прочностной надежности

Математическая модель надежности ТЭУ определяется формулой

$$R_{ТЭУ} = R_{П} \cdot R_{Р} \cdot R_{Г}, \quad (4.1)$$

где  $R_{П}$  – вероятность безотказной работы ТЭУ при выведении на орбиту;

$R_{Р}$  – вероятность безотказной работы ТЭУ на рабочем режиме;

$R_{Г}$  – вероятность безотказной работы ТЭУ при глушении.

Каждый из блоков структурной схемы прочностной надежности рисунка 4.1 содержит в себе аналогичную схему, состоящую из элементов, составляющих надежность данного блока. К примеру, исходя из структурной схемы отказа ТЭУ для рабочего режима (рисунок 4.2а) следует схема прочностной надежности, представленная на рисунке 4.2б и соответствующая математическая модель надежности (4.2).

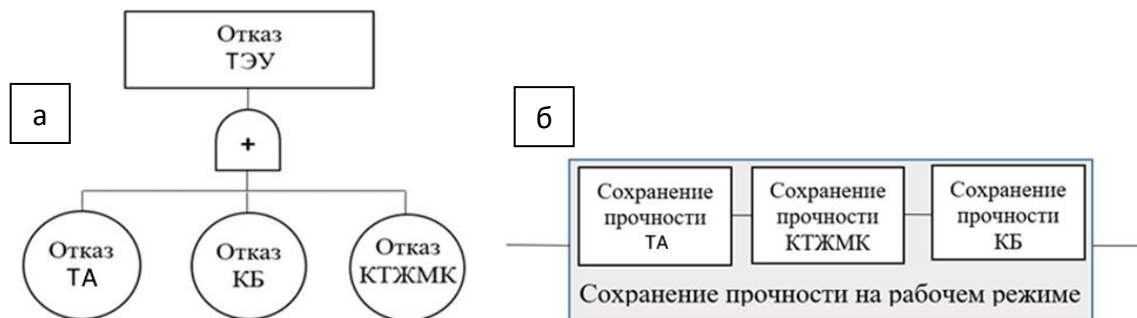


Рисунок 4.2 - Схема отказа (а) и схема прочностной надежности (б) для ТЭУ на рабочем режиме.

Математическая модель надежности ТЭУ определяется формулой из

$$R_{Р} = R_{ТА} \cdot R_{КТЖМК} \cdot R_{КБ}, \quad (4.2)$$

где  $R_{Р}$  – вероятность безотказной работы ТЭУ на рабочем режиме,

$R_{ТА}$  – вероятность безотказной работы ТА,

$R_{КТЖМК}$  – вероятность безотказной работы КТЖМК,

$R_{КБ}$  – вероятность безотказной работы КБ.

Вероятность безотказной работы определяется следующим соотношением

$$R = \Phi \left( \frac{\sigma_{\text{ПРЕД}} - \sigma_{\text{ДЕЙСТВ}}}{\sqrt{\sigma_{\text{ОТКЛ.ПРЕД}}^2 + \sigma_{\text{ОТКЛ.ДЕЙСТВ}}^2}} \right) = \Phi \left( \frac{\sigma_{\text{ПРЕД}} - \sigma_{\text{ДЕЙСТВ}}}{\sqrt{(v_M \sigma_{\text{ПРЕД}})^2 + (v_N \sigma_{\text{ДЕЙСТВ}})^2}} \right), \quad (4.3)$$

где  $\Phi(\gamma)$  - функция Лапласа,  $\gamma$  – квантиль нормального распределения,

$\sigma_{\text{ПРЕД}}$  - значение напряжений, считаемое отказом, МПа,

$\sigma_{\text{ДЕЙСТВ}}$  - рассчитанное значение напряжений, МПа,

$\sigma_{\text{ОТКЛ.ПРЕД}}$  - среднеквадратическое отклонение допускаемых напряжений, МПа,

$\sigma_{\text{ОТКЛ.ДЕЙСТВ}}$  - среднеквадратическое отклонение расчетных напряжений, МПа,

$v_M$  - коэффициент вариации допускаемых напряжений,

$v_N$  - коэффициент вариации расчетных напряжений.

Если значение квантили  $\gamma > 3,9$ , то показатель надежности рассматриваемого элемента в механическом смысле  $R = \Phi(\gamma) = 1$ .

Аналогично определяются показатели для всех исследуемых элементов.

Описанный подход обоснования ресурса на основе определения надежности применяется в данной работе, совместно с выработкой подхода к определению неизвестных коэффициентов вариации  $v_M$  и  $v_N$  в условиях недостаточности исходных данных.

Полученные прочностные модели и модели надежности были положены в основу имитационной модели ТЭУ, разработанной с использованием «нативной» интеграции прочностного пакета CAE Fidesys и языка Python (рисунок 4.4).

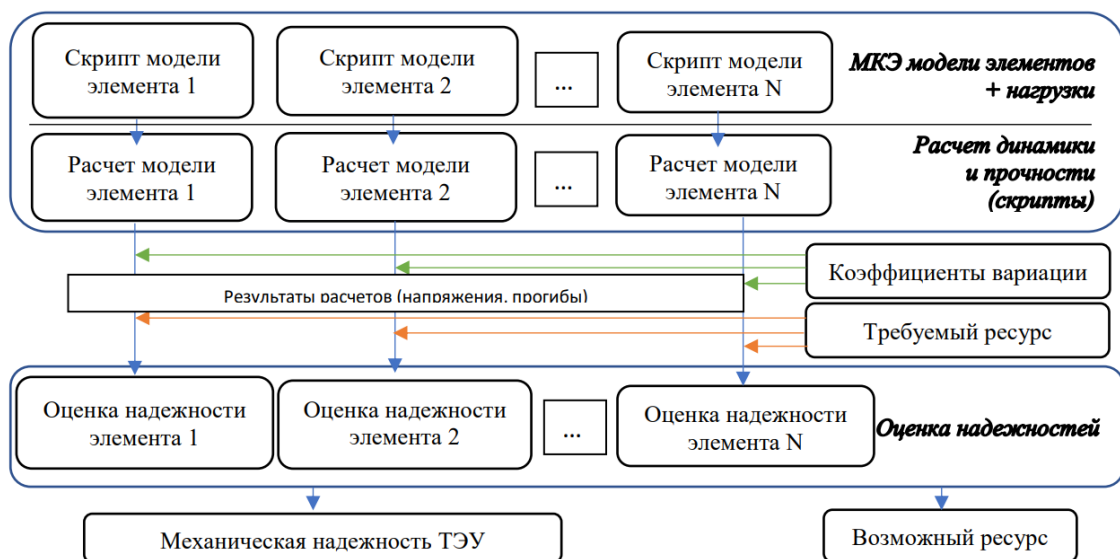


Рисунок 4.4 – Структурная схема модели

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ:

1. Проведены исследования НДС и прочностной надежности важнейших узлов, из которых состоит современная тепловая энергетическая установка (ТЭУ) нового поколения с термоэмиссионным преобразователем, на основе которых обоснованы конструктивные решения, обеспечивающие длительный ресурс (порядка 5-10 лет) энергоустановки подобного типа.

2. Разработана комплексная методика обоснования длительного ресурса и прочностной надежности узлов и элементов ТЭУ в условиях недостаточности исходных данных, необходимых для определения показателей надежности. Методика опирается на комбинированный подход, в котором для некоторых узлов используется вероятностная оценка надежности с учетом коэффициентов вариации, для других – оценка, полученная при реальных или модельных испытаниях.

3. Для ТЭУ нового поколения с термоэмиссионным преобразователем выполнены расчетно-экспериментальные исследования:

- динамики и прочности некоторых элементов кинематической цепи органов регулирования теплообменного аппарата;
- функционирования механизма “сброса” регулирующего стержня при деформировании канала;
- условий заклинивания регулирующего стержня;
- прочности сильфона компенсационного бака при циклическом нагружении.

Выполнена также валидация конечно-элементных расчетов теплообменного аппарата с трубным пакетом, являющегося полным конструктивным аналогом источника тепла в рассматриваемом ТЭУ, на основе эксперимента.

4. Разработана имитационная цифровая модель – цифровой двойник, который позволяет оценивать прочность и механическую надежность элементов ТЭУ.

5. Результаты работы использованы в эскизном проекте на КТЭУ нового поколения (подтверждены актом о внедрении), в котором приведен полученный для энергоустановки с требуемым механическим ресурсом показатель надежности 0,997.

## ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### Открытые публикации по перечню рецензируемых изданий ВАК

1. Глазюк Я.В., Демидов А.С., Кашелкин В.В., **Попов В.Ю.** Анализ напряженно-деформированного состояния деталей кожухотрубного теплообменника тороидальной формы, возникающего вследствие разности температур трубного пакета и корпуса // Тепловые процессы в технике. 2023. Т. 15. № 5. Сс.195-202.

2. **Попов В.Ю.** Практика геометрического и конечно-элементного моделирования кожухотрубных теплообменных аппаратов космических тепловых энергетических установок // Тепловые процессы в технике. 2023. Т. 15. № 8. Сс.357-363.

### По перечню рецензируемых изданий SCOPUS

3. **Popov V.Yu.**, Kashelkin V.V., Fedorov M.Yu., Demidov A.S. Assessment of the strength reliability of high-temperature heat exchangers with long service life at the design stage // *Frattura ed Integrità Strutturale*. 2021. Vol. 55. P. 136–144. DOI: 10.3221/IGF-ESIS.55.10.

### Прочие публикации

4. Кашелкин В.В., **Попов В.Ю.**, Федоров М.Ю. Численное моделирование напряженно-деформированного состояния теплообменного аппарата с трубным пакетом // Численные методы решения задач теории упругости и пластичности. Материалы XXIV Всероссийской конференции. Научный редактор В. М. Фомин., Омск, 02–04 июня 2015 года.

5. Кашелкин В.В., **Попов В.Ю.**, Сафронов А.И. Исследование динамики органов регулирования реактора космической ЯЭУ // VII Российская конференция «Методы и программное обеспечение расчетов на прочность» АО «НИКИЭТ» 2012 г.

6. Кашелкин В.В., **Попов В.Ю.**, Федоров М.Ю. Моделирование напряженно-деформированного состояния теплообменного аппарата с трубным пакетом // VIII Российская конференция «Методы и программное обеспечение расчетов на прочность» АО «НИКИЭТ» 2014 г.

7. Popov V.Y., Kashelkin V.V., Fedorov M.Y., Demidov A.S. Problems of assessing the strength reliability of high-temperature heat exchangers with long operational resources at the design stage // 18th International Conference "Aviation and Cosmonautics - 2019". Abstracts: Тезисы. – Москва. –2019. – с.500