

На правах рукописи

Гусев Михаил Павлович

**Разработка методов расчета релаксационной стойкости тепло-  
выделяющих сборок атомного реактора**

01.02.06 – Динамика, прочность машин, приборов и аппаратуры

Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата  
технических наук

Handwritten signature of the author, M. P. Gusev, in cursive script.

Москва – 2016

Работа выполнена в Московском Государственном Техническом Университете им. Н.Э Баумана.

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор  
**Данилов Владимир Львович**

Официальные оппоненты: **Киселев Алексей Сергеевич**, доктор технических наук, ведущий научный сотрудник НИЦ «Курчатовский Институт»

**Макаров Виктор Васильевич**, кандидат технических наук, начальник лаборатории экспериментальных исследований прочности оборудования АЭС АО ОКБ «ГИДРОПРЕСС».

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук

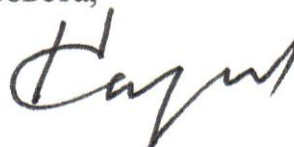
Защита диссертации состоится 16 ноября 2016 г. в 15.00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.141.03 при Московском Государственном Техническом Университете им. Н.Э. Баумана по адресу: 105005, г. Москва, 2-ая Бауманская ул., д.5, стр. 1.

Ваш отзыв в двух экземплярах, заверенных печатью, просим выслать по указанному адресу.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана и на сайте [www.bmstu.ru](http://www.bmstu.ru).

Автореферат разослан « \_\_ » \_\_\_\_\_ 2016 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,  
д.т.н., доцент



Карпачев А.Ю.

## **Общая характеристика работы**

**Актуальность темы.** Тепловыделяющие сборки (ТВС) реакторов ВВЭР в настоящее время широко используются на отечественных и на зарубежных атомных энергетических станциях. Эксплуатация топливных сборок в активных зонах реактора происходит при повышенных температурах и в условиях интенсивных нейтронных воздействий. При таких условиях эксплуатации в нагруженных конструктивных элементах ТВС развиваются деформации ползучести и происходят процессы релаксации напряжений. Ползучесть, релаксация напряжений и эксплуатационные нагрузки, действующие в ТВС, приводят к ее необратимому искривлению, что является существенной проблемой, которая может привести к локальному перегреву активной зоны и к проектным или запроектным авариям на атомной энергетической станции.

Решение проблемы предотвращения искривления или необратимого формоизменения ТВС, включает в себя мероприятия по совершенствованию конструкции, подробный расчетный анализ топливной сборки, а также разработку методов расчета ТВС, проводимые с целью прогнозирования искривления ТВС.

Таким образом, актуальность работы обусловлена необходимостью разработки методики расчета искривления или релаксационной стойкости ТВС – способности конструкции ТВС сохранять свою жесткость при релаксации напряжений.

**Степень разработанности темы.** Современные методики расчета релаксационной стойкости ТВС включают в себя достаточно много особенностей, в том числе, учет ползучести и релаксации напряжений, что отражается в работах В.М. Троянова, В.П. Семишкина, В.Л. Данилова, А.С. Киселева, Д.Н. Пузанова и др. Однако в методиках расчета, предложенных этими учеными, не принимаются во внимание такие факторы, влияющие на искривление ТВС, как релаксация осевой силы пружинного блока ТВС и изменение ее точки приложения во времени. В разрабатываемом методе расчета учтены все вышеуказанные факторы, влияющие на искривление ТВС.

**Цель и задачи работы:** разработка методики, алгоритма и программы расчета релаксационной стойкости тепловыделяющей сборки атомного реактора, учитывающих ползучесть элементов конструкции сборки и релаксацию напряжений в наиболее нагруженных узлах.

**Для достижения поставленной цели потребовалось решить следующие задачи:**

1. Проведение анализа разработанных ранее методов расчета релаксационной стойкости и геометрической стабильности ТВС атомного реактора и оценка степени их полноты с точки зрения учета основных факторов, влияющих на искривление сборки;

2. Экспериментальное исследование релаксации контактного взаимодействия между твэлами и ячейками дистанционирующих решеток (ДР) с целью подтверждения релаксационных процессов в ТВС;
3. Разработка расчетно-экспериментальной методики верификации температурного закона ползучести для циркониевого сплава Э110 (Zr1%Nb) – материала твэлов и ДР в ТВС;
4. Исследование влияния эксплуатационных факторов на релаксацию контактного взаимодействия между твэлами и ячейками ДР;
5. Верификация радиационного закона ползучести для сплава Э110;
6. Разработка комплексной методики расчета релаксационной стойкости тепловыделяющей сборки атомного реактора;
7. Разработка методики расчета релаксации осевой силы, приводящей к искривлению ТВС и действующей от пружинного блока ТВС.

**Методы исследования.** Для разработки методики расчета релаксационной стойкости ТВС при эксплуатационных нагрузках, применялись инженерные подходы и методы механики деформируемого твердого тела. При деформировании ТВС рассматривалась как обобщенный стержень с набором элементов, работающих только на растяжение и сжатие. Учет ползучести и релаксации напряжений производился в соответствии с моделями установившейся ползучести. Для исследования релаксационных процессов между твэлами и дистанционирующими решетками применялся конечно-элементный пакет ANSYS. Управление расчетами, вывод графических результатов осуществлялись в математическом пакете MatLAB. Алгоритмы метода расчета релаксационной стойкости ТВС были реализованы в разработанных программах в среде MatLAB.

**Научная новизна** работы состоит в следующих положениях:

1. Разработана математическая модель деформирования тепловыделяющей сборки, основанная на балочно-стержневом представлении ТВС, которая позволяет учитывать ползучесть элементов конструкции сборки, релаксацию контактных сил между твэлами и ячейками ДР и релаксацию осевой силы, действующей от пружинного блока;
2. Предложена математическая модель расчета релаксации осевой силы пружинного блока, учитывающая разброс геометрических параметров пружин, неоднородность температурного и нейтронного полей и позволяющая определять эксцентриситет точки приложения осевой силы относительно геометрической оси ТВС.
3. Разработана расчетно-экспериментальная методика верификации констант в законе ползучести, основанная на методе многокритериальной оптимизации, и позволяющая использовать результаты различных типов испытаний для верификации констант.
4. Предложена методика экспериментального исследования релаксации контактного взаимодействия между твэлами и ячейками ДР, подтверждающая наличие релаксационных процессов в элементах ТВС;

5. Установлены эффекты проскальзывания твэлов в ячейках ДР, которые оказывают влияние на искривление конструкции ТВС.

**Достоверность результатов** и научных положений обоснована:

1. Применением классических подходов и методов механики деформируемого твердого тела и теории ползучести.
2. Использованием в методике расчета релаксационной стойкости ТВС верифицированного закона ползучести.
3. Результатами экспериментальных исследований, подтверждающими наличие релаксационных процессов в элементах ТВС.
4. Удовлетворительным совпадением результатов расчета с экспериментальными данными исследований искривления ТВС.

**Практическая ценность** работы заключается в следующих результатах:

1. Разработана методика расчета релаксационной стойкости тепловыделяющей сборки, учитывающая ползучесть основных элементов сборки, релаксацию напряжений между твэлами и ДР и релаксацию осевой силы пружинного блока ТВС;
2. Разработаны алгоритм и пакет прикладных программ для расчета релаксационной стойкости ТВС, зарегистрированных в отделе регистрации программ для ЭВМ ФГУ ФИПС, написанных на языке MatLAB и позволяющих получать результаты для различных модификаций сборок при различных силовых нагрузках, действующих на сборку;
3. Предложена методика расчета, позволяющая с использованием экспериментальных данных по радиационной или термической ползучести, определять константы законов ползучести конструкционных материалов элементов ТВС;
4. Результаты работы могут быть использованы на предприятиях Росатома при модернизации ядерного топлива.

**На защиту выносятся следующие научные положения:**

- 1) Методика расчета релаксационной стойкости ТВС, позволяющая определять искривление конструкции сборки в зависимости от времени эксплуатации;
- 2) Методика экспериментальных исследований релаксации контактных сил между твэлом и ячейкой дистанционирующей решетки;
- 3) Методика расчета релаксации осевой силы пружинного блока ТВС, позволяющая определять эксцентриситет точки приложения силы относительно геометрической оси ТВС;
- 4) Методика верификации констант в законе ползучести с использованием экспериментальных данных различного типа;
- 5) Влияние проскальзывания твэлов в ячейках ДР на искривление конструкции ТВС.

**Реализация работы.** Программа расчета релаксационной стойкости ТВС, основанная на разработанной методике расчета, зарегистрирована в

отделе регистрации программ для ЭВМ ФГУ ФИПС. Результаты работы используются в учебном процессе МГТУ им. Н.Э. Баумана.

**Апробация работы.** Основные результаты и положения работы докладывались на всероссийских и международных научных конференциях.

- Школа-семинар для молодых ученых, ИСМАН РАН (Черноголовка, 2012 - 2015 г);
- Международная научно-инновационная молодежная конференция «Современные твердофазные технологии: теория, практика и инновационный менеджмент», ТГТУ (Тамбов, 2013 - 2015 г);
- X международная азиатская школа-семинар «Проблемы оптимизации сложных систем», Институт теоретической и прикладной математики НАН КР, (Кыргызская Республика, Бишкек, 2014 г);
- I Международная конференция молодых ученых «Электротехника, Энергетика, Машиностроение», НГТУ (Новосибирск, 2014 г);
- VI Международная конференция «Проблемы механики современных машин», ВСГУТУ (Улан-Удэ, 2015 г);
- Всероссийская научно-техническая конференция «Механика и математическое моделирование в технике», РАН, МГТУ им. Н.Э. Баумана (Москва, 2016 г).

**Публикации.** По теме диссертации опубликована 21 работа, из них 7, входящих в Перечень ведущих периодических изданий, рекомендованных ВАК РФ, 1 статья в зарубежном научном издании, входящем в реферативную базу Scopus, общим объемом 8.17 п.л./6.55 п.л.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, пяти глав, выводов и списка литературы. Материалы исследований изложены в работе на 157 страницах с ил. и 7 табл. Библиография работы содержит 116 наименований.

## Содержание работы

**Во введении** обоснована актуальность темы, сформулированы цель научного исследования, задачи, научная новизна и практическая ценность работы. Приведено краткое содержание работы по главам.

**В первой главе** описываются предпосылки создания расчетных методик релаксационной стойкости или деформирования ТВС, приводится анализ факторов, влияющих на формоизменение ТВС во времени, и аналитический обзор методов расчета релаксационной стойкости ТВС.

ТВС реакторов ВВЭР-1000 (Рис. 1) эксплуатируются при повышенных температурах и в условиях интенсивных нейтронных воздействий. При таких условиях в элементах конструкции ТВС развиваются деформации ползучести, сопровождающиеся радиационным ростом, и в нагруженных элементах происходят процессы релаксации напряжений.

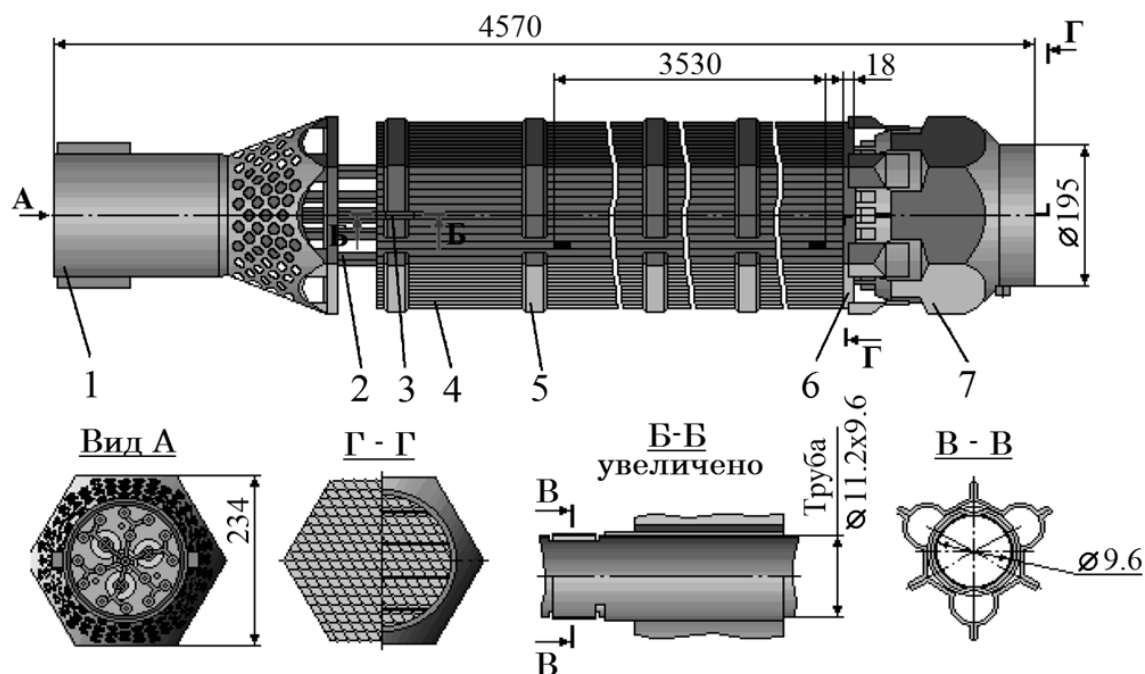


Рис. 1. Схема тепловыделяющей сборки: 1 – головка; 2 – направляющий канал (НК); 3 – труба центральная; 4 – тепловыделяющий элемент (ТВЭЛ); 5 – дистанционирующая решетка (ДР); 6 – решетка нижняя; 7 – хвостовик.

Под действием эксплуатационных нагрузок и при недостаточной деформационной (релаксационной) стойкости ТВС может происходить существенное искривление ТВС. Искривление ТВС вызывает ряд серьезных проблем, таких как неполное погружение стержней регулирования и снижение величины межкассетных зазоров между соседними ТВС. Последствиями вышеуказанных проблем может оказаться локальный перегрев активной зоны реактора и, в случае негативного развития сценария, аварийная ситуация на АЭС.

В связи с этим актуальным вопросом становится расчетное обоснование искривления тепловыделяющих сборок, выраженное в виде методики расчета релаксационной стойкости ТВС.

Анализ расчетных методик релаксационной стойкости или деформирования ТВС показал, что существующие методики можно разделить на несколько типов: расчетные методики, основанные на конечно-элементном моделировании, с применением стандартных КЭ пакетов ANSYS, Abacus и др., и представленные в работах В.М. Троянова, В.П. Семишкина; методики, основанные на КЭ подходе, но с применением оригинальных программных кодов, представленные в трудах А.С. Киселева и А.А. Тутнова; инженерные методики, основанные на упрощенных моделях механики сплошной среды, представленные в работах В.Л. Данилова и В.М. Троянова.

К числу достоинств конечно-элементного подхода, можно отнести высокую степень детализации конструкции и возможность описания локаль-

ных эффектов деформирования, но при этом возрастает число степеней свободы задачи. Инженерные методики не обладают возможностью описывать локальные эффекты деформирования ТВС, однако, расчет искривления ТВС в целом, производится с достаточно высокой точностью и осуществляется с меньшими затратами машинного времени.

При расчетах элементов конструкций ТВС учет ползучести и релаксации напряжений в нагруженных элементах ТВС производится по следующему закону ползучести

$$\xi_e = A\varphi \exp\left(-\frac{Q}{T}\right)\sigma_e^n, \quad (1)$$

где  $\xi_e$  – интенсивность скорости деформаций ползучести;  $A$ ,  $n$ ,  $Q$  – экспериментальные константы;  $\varphi$  – плотность потока нейтронов;  $T$  – температура;  $\sigma_e$  – интенсивность напряжений.

В работах В.М. Троянова, Д.Н. Пузанова и А.Я. Рогозянова материальные константы для циркониевого сплава Э110 в зависимости (1) различаются, поэтому актуальным является расчетно-экспериментальная верификация констант.

Учет радиационного роста циркониевых сплавов в разрабатываемой методике расчета производится в соответствии с работой И.Н. Васильченко: для сплава Э110  $\varepsilon_r = 10^{-25}(\varphi \cdot t)$ ; для сплава Э635  $\varepsilon_r = 0.48 \cdot 10^{-25}(\varphi \cdot t)$ , где  $\varepsilon_r$  – деформации, вызванные радиационным ростом,  $t$  – время.

Процессы развития деформаций ползучести, релаксация напряжений в нагруженных узлах, неодинаковый радиационный рост различных конструкционных материалов ТВС, а также неоднородность температурного и нейтронного полей вызывают проскальзывание твэлов в ячейках дистанционирующих решеток (ДР), релаксацию осевой силы пружинного блока и эксцентриситет ее точки приложения относительно геометрической оси сборки. В методике расчета релаксационной стойкости ТВС в полной мере произведен учет всех вышеуказанных особенностей.

**Во второй главе** представлены результаты экспериментального исследования процесса релаксации контактных сил между твэлами и ячейками дистанционирующих решеток при температурном воздействии. Предложена методика верификации констант в законе ползучести (1). Определены оптимальные константы в температурном законе ползучести.

Экспериментальные исследования выполнены с целью подтверждения наличия процессов релаксации и для получения числовых значений контактных сил при релаксации. Образцы для испытания состояли из участков твэлов, посаженных в ячейках фрагментов ДР (Рис. 2).



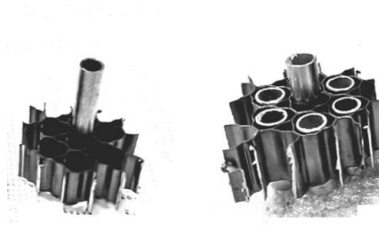


Рис. 2. Образцы для испытания на релаксацию контактного взаимодействия твэла в ячейке ДР

Эксперимент состоял из трех этапов: на первом этапе производился ввод твэлов в ячейки ДР на испытательной машине и фиксировалась сила ввода; на втором этапе образцы выдерживали заданное время при определенной температуре в печи в среде аргона; на третьем этапе, после выдержки образцов в печи, производилось извлечение твэлов из ячеек ДР и фиксировалась сила при извлечении. По значениям сил определялись количественные характеристики релаксации контактной силы.

В результате экспериментальных исследований было подтверждено наличие релаксационных процессов между твэлами и ДР. Полученные в результате экспериментов количественные значения, отражающие релаксацию, были использованы для верификации констант в температурном законе ползучести (1) (без учета плотности потока нейтронов). Верификация материальных констант была необходима, поскольку в литературных источниках наблюдается существенный разброс значений констант. Для верификации констант была разработана методика, позволяющая определять оптимальные константы.

В основе методики верификации лежит метод многокритериальной оптимизации и анализ чувствительности модели. Отличительной особенностью методики верификации констант является возможность использовать экспериментальные данные, различного типа испытаний.

Методика верификации констант построена на математическом моделировании эксперимента по релаксации контактных сил между твэлами и ячейками ДР и определению оптимальных констант, при которых расчетные значения контактных сил хорошо согласуются с экспериментальными.

Согласно методике оптимальные константы в законе ползучести (1) определяются из соотношения

$$\{P_i\} = \{P_{i-1}\} + [S]_i^{\dagger} (\{F_i^r\} - \{F_e^r\}). \quad (2)$$

Здесь  $\{P_i\}$ ,  $\{P_{i-1}\}$  – вектора констант  $A$ ,  $Q$ ,  $n$  на текущем и предыдущем расчете  $i$  и  $i-1$ ;  $\{F_i^r\}$ ,  $\{F_e^r\}$  – вектора расчетных и экспериментальных значений контактных сил при релаксации;  $[S]_i^{\dagger}$  – псевдообратная матрица чувствительности. Элементы матрицы чувствительности  $[S]_i$  определяются как

$$s_{i1} = \frac{F_i^r(A + \Delta A, Q, n) - F_{ei}^r}{\Delta A}, \dots, s_{i3} = \frac{F_i^r(A, Q, n + \Delta n) - F_{ei}^r}{\Delta n}. \quad (3)$$

Здесь  $i = 1 \div N$ , где  $N$  – число экспериментальных значений.

Алгоритм методики верификации реализован автором в программном коде среды MatLAB.

В результате применения разработанной методики верификации были определены значения оптимальных констант в температурном законе ползучести.

$$A = 6.29 \cdot 10^{-15} \text{ 1/(Па}^n \cdot \text{ч)}, Q = 1.30 \cdot 10^4 \text{ К}, n = 1.42. \quad (4)$$

Расчеты релаксации контактных сил, произведенные с применением найденных констант (4), хорошо согласуются с экспериментальными данными (в пределах 10 %, Рис. 3), что подтверждает достоверность методики верификации констант.



Рис. 3. Сравнение расчетных и экспериментальных значений при расчете релаксации контактных сил с оптимальными константами (4)

**В третьей главе** представлен расчетный анализ релаксации контактных сил между твэлами и дистанционирующими решетками в зависимости от осевого воздействия на твэл и коэффициента трения между оболочками твэла и ячейки ДР. Приведены результаты расчетов релаксации контактных сил с использованием констант из работ В.М. Троянова, Д.Н. Пузанова и А.Я. Рогозянова.

Анализ релаксации контактных сил между твэлом и ДР было произведено с целью исследования различных факторов, влияющих на процесс релаксации, а также для последующего учета релаксации контактных сил в расчетной методике релаксационной стойкости ТВС.

Исследование процесса релаксации контактных сил между твэлами ячейками ДР вызвано необходимостью определения условий проскальзывания твэлов в ячейках ДР, для их последующего учета в методике расчета релаксационной стойкости ТВС.

Расчетный анализ производился в КЭ пакете ANSYS 12. Обработка результатов выполнялась в математическом пакете MatLAB.

Влияние осевого воздействия на твэл и коэффициента трения между оболочками твэла и ДР на релаксацию контактного взаимодействия представлено на Рис. 4.

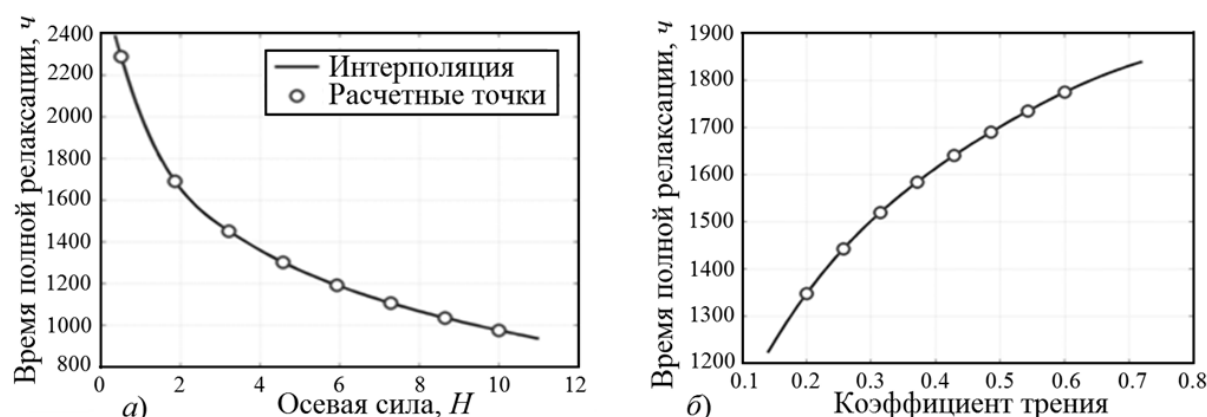


Рис. 4. Зависимость времени полной релаксации от осевой силы в твэле (а) и коэффициента трения (б)

На Рис. 4 время полной релаксации – это момент времени, при котором силы трения  $F_{fr}$  равны осевому воздействию на твэл. В этот момент времени происходит проскальзывание твэлов в ячейках ДР. Силы трения между оболочками твэла и ДР связаны с контактными силами  $F_c$  коэффициентом трения  $\mu$

$$F_{fr} = 3\mu F_c. \quad (5)$$

Множитель 3 в соотношении (5) связан с наличием трех контактных областей между твэлом и ячейки ДР (Рис. 1).

Расчеты релаксации контактных сил с использованием констант из работ В.М. Троянова (2), Д.Н. Пузанова (1) и А.Я. Рогозянова (3) показали существенное различие скорости релаксации, что подтверждает Рис. 5.

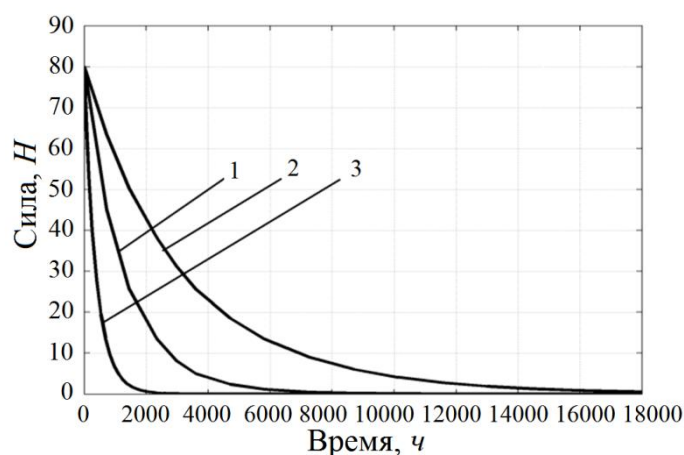


Рис. 5. Результаты расчетов релаксации контактной силы с различными константами

Поскольку наблюдается существенное отличие в расчетах релаксации контактной силы с использованием констант, взятых из трех литературных источников, то необходима верификация константы  $A$  в радиационном законе ползучести (1).

**В четвертой главе** представлены результаты расчетной верификации константы  $A$  в радиационном законе ползучести, с использованием экспериментальных данных по радиационной ползучести, взятых из литературных источников.

Необходимость верификации только одной константы в законе ползучести (1), вызвана тем, что указанная константа связана с нейтронным облучением, а константы  $Q$ ,  $n$  связаны с температурой и напряжением и были определены в результате верификации с использованием экспериментальных данных по релаксации контактных сил между твэлом и ячейкой ДР (глава 2). При этом применялась разработанная методика верификации констант и были использованы экспериментальные данные работы А.Я. Рогозянова по испытаниям твэльных трубок, нагруженных внутренним давлением при различной мощности нейтронного облучения и различных температурах.

В результате верификации значение константы  $A$  для сплава Э110 составило  $3.59 \cdot 10^{-23} \text{ м}^2 \text{ с} / (\text{Па}^n \cdot \text{н})$ .

**В пятой главе** изложены основные соотношения расчетной методики релаксационной стойкости ТВС, приведены зависимости, описывающие релаксацию пружин блока ТВС. Обосновывается достоверность разработанной методики путем сравнения результатов решения задачи деформирования ТВС с экспериментальными данными. Представлены результаты расчетов формоизменения ТВС в виде графиков.

В основе расчетной методики релаксационной стойкости ТВС лежит представление ТВС в виде стержневой модели, которая построена на гипотезе плоских сечений, учитывает сдвиговую жесткость ДР и включает набор элементов, работающих только на растяжение или сжатие. Эта модель позволяет учитывать напряженно-деформированное состояние твэлов и направляющих каналов. Физические соотношения связи между деформациями и напряжениями включают линейный и нелинейные механизмы.

$$\varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ij}^e + \varepsilon_{ij}^n; \quad \sigma_{ij} = E_i (\chi_{xj} y_i - \chi_{yj} x_i + \varepsilon_{0j} - \varepsilon_{ij}^n). \quad (6)$$

где  $\varepsilon_{ij}$ ,  $\sigma_{ij}$  – деформации и напряжения в  $i$ -ом твэле или НК на  $j$ -ом участке;  $\varepsilon_{ij}^e$  – упругая деформация;  $\varepsilon_{ij}^n$  – нелинейная деформация, включающая деформации ползучести, фиктивные деформации, связанные с проскальзыванием твэлов в ячейках ДР, температурные деформации и деформации, вызванные радиационным ростом;  $E_i$  – модуль упругости в  $i$ -ом твэле или НК;  $\chi_{xj}$ ,  $\chi_{yj}$ ,  $\varepsilon_{0j}$  – кривизны и осевая деформация обобщенного стержня на  $j$ -ом участке.

Индексация в соотношении (6) относится к разбиению стержневой модели ТВС на участки, разделенные узлами – локациями ДР в ТВС (Рис. 6).

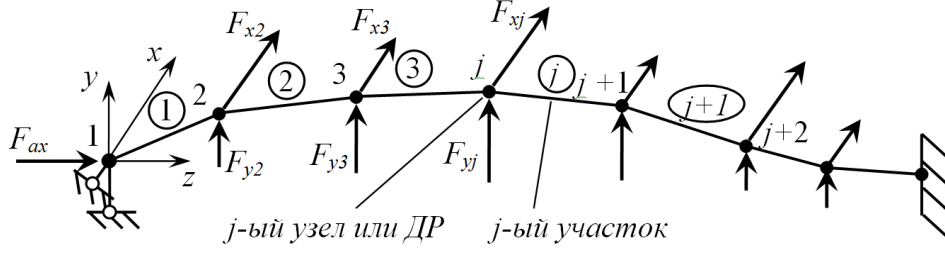


Рис. 6. Расчетная схема представления ТВС в виде стержневой модели, разделенной на участки

Изгиб обобщенного стержня описывается в соответствии с дифференциальным уравнением изгиба, кривизна каждого участка стержня, между двумя соседними узлами считается постоянной

$$\chi_{xj} = -\frac{M_{xj}}{E_j J_{xj}} - \frac{1}{G_j A_j} \frac{dQ_{yj}}{ds} - \frac{M_{xj,n}}{E_j J_{xj}}. \quad (7)$$

Здесь  $M_{xj}$  – изгибающий момент от действия внешних поперечных сил  $F$  и осевой силы пружинного блока  $F_{ax}$ , (Рис. 6);  $E_j J_{xj}$  – изгибная жесткость  $j$ -ого участка ТВС;  $G_j A_j$  – сдвиговая жесткость  $j$ -ого участка ТВС;  $Q_{yj}$  – поперечная сила;  $s$  – координата вдоль оси ТВС;  $M_{xj,n}$  – изгибающий момент, обусловленный нелинейными деформациями  $\varepsilon_{ij}^n$ .

Запись уравнения (7) для всех участков ТВС и выражение кривизн через прогибы приводит к системе линейных алгебраических уравнений относительно прогибов узлов  $v_{yj}$ .

$$\begin{bmatrix} G_{22} & G_{23} & \dots & 0 & 0 \\ G_{32} & G_{33} & G_{34} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & \dots & G_{j-1,j-2} & G_{j-1,j-1} & G_{j-1,j} \\ 0 & 0 & \dots & G_{j,j-1} & G_{j,j} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{y2} \\ v_{y3} \\ \vdots \\ v_{y,j-1} \\ v_{yj} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_2 \\ H_3 \\ \vdots \\ H_{j-1} \\ H_j \end{bmatrix}; \quad (8)$$

$$G_{j,j-1} = \frac{\Delta s_j}{\Delta s_{j-1}} + \frac{F_{ax}}{4B_{xj-1}} \Delta s_{j-1} \Delta s_j; \quad G_{jj} = -\left( 1 + \frac{\Delta s_j}{\Delta s_{j-1}} - \frac{F_{ax}}{4B_{xj-1}} \Delta s_{j-1} \Delta s_j - \frac{F_{ax}}{4B_{xj}} (\Delta s_j)^2 \right)$$

$$G_{j,j+1} = 1 + \frac{F_{ax}}{4B_{xj}} (\Delta s_j)^2; \quad H_j = -\frac{1}{2} f_{x,j-1} \Delta s_{j-1} \Delta s_j - \frac{1}{2} f_{xj} (\Delta s_j)^2;$$

$$B_{xj} = \sum_i E_i y_i^2 A_i; \quad f_{xj} = M_{xj} / B_{xj}.$$

Решение системы уравнений (8) позволяет определить прогибы осевой линии стержневой модели ТВС  $v_{yj}$ . По аналогии, определяются прогибы  $v_{xj}$ .

Фиктивные деформации твэлов  $\varepsilon_{ij}^f$ , вызванные проскальзыванием, определяются из условия равенства сил трения между твэлами и ДР  $F_{fr,ij}$  и осевой силы, действующей в твэле.

$$\begin{cases} \left| \sigma_{i,j+1} - E_i \varepsilon_{i,j+1}^f - \sigma_{ij} + E_i \varepsilon_{ij}^f \right| = \frac{F_{fr,ij}}{A_i}, & \text{if } \left| \sigma_{i,j+1} - \sigma_{ij} \right| \geq \frac{F_{fr,ij}}{A_i} \\ -E_i \varepsilon_{i,j+1}^f + E_i \varepsilon_{ij}^f = 0, & \text{if } \left| \sigma_{i,j+1} - \sigma_{ij} \right| < \frac{F_{fr,ij}}{A_i} \end{cases}. \quad (9)$$

Здесь  $\varepsilon_{ij}^f$ ,  $\varepsilon_{i,j+1}^f$  – фиктивные деформации на  $j$ -ом и  $j+1$ -ом ках;  $F_{fr,ij}$  – сила трения между твэлом и ДР в  $j$ -ом узле, определяемая из решения задачи релаксации контактных сил между твэлом и ячейкой ДР в КЭ пакете ANSYS 12;  $A_i$  – площадь поперечного сечения  $i$ -ого твэла.

Входящая в уравнение (9) осевая сила пружинного блока  $F_{ax}$  определяется из решения задачи релаксации силы сжатия пружины. Определение силы сжатия пружины в пределах упругости получено в соответствии с работами С.Д. Пономарева.

$$F_{ax} = \frac{4GJ_p \cos \alpha}{D} \left( \frac{\sin \alpha \cos \alpha}{D} - \frac{\sin \alpha_0 \cos \alpha_0}{D_0} \right) - \frac{4EJ_y \sin \alpha}{D} \left( \frac{\cos^2 \alpha}{D} - \frac{\cos^2 \alpha_0}{D_0} \right).$$

Здесь  $D$ ,  $D_0$ ,  $\alpha$ ,  $\alpha_0$  – геометрические параметры пружины, а  $GJ_p$ ,  $EJ_y$  – ее жесткостные параметры. Решение задачи релаксации пружины получено на основе модели установившейся ползучести.

Наличие эксцентриситета точки приложения осевой силы связано с неодинаковой релаксацией каждой пружины блока, вследствие неоднородности температурного поля, а также из-за технологических допусков изготовления пружин.

Достоверность основных уравнений разработанной методики расчета релаксационной стойкости ТВС подтверждается удовлетворительным совпадением расчетных и экспериментальных данных по циклическому деформированию ТВС внешней поперечной силой (Рис. 7).

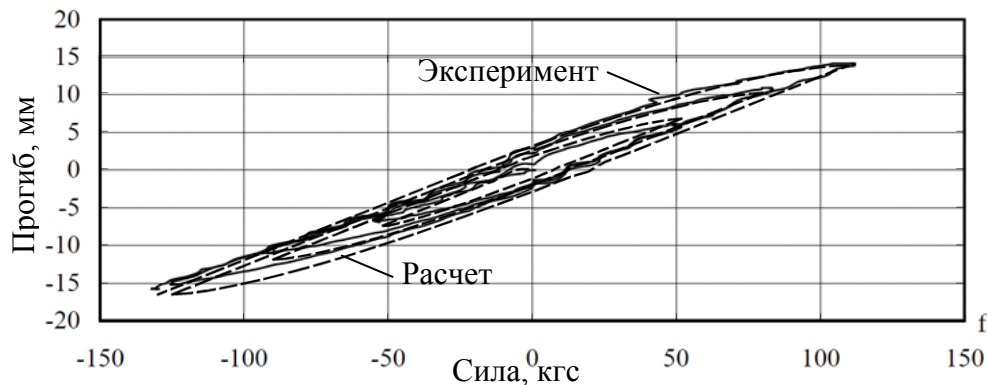


Рис. 7. Расчетные и экспериментальные значения прогибов центральной ДР ТВС, при приложении к ней знакопеременной поперечной силы

Алгоритм и программа, разработанные на основе методики расчета релаксационной стойкости ТВС, позволяют получать напряженно-деформированное состояние ТВС в зависимости от времени. На Рис. 8 представлены результаты изменения во времени прогиба ТВС.

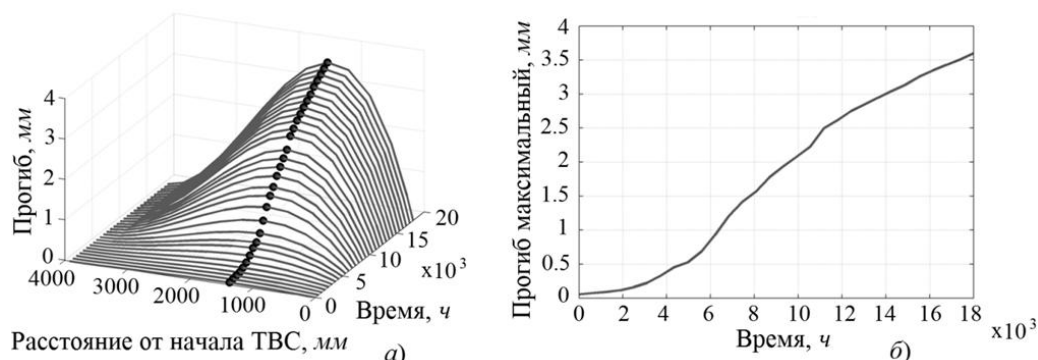


Рис. 8. Абсолютное значение прогиба ТВС в зависимости от времени при воздействии на ТВС только осевой силы пружинного блока (12-8 кН): (а) – прогибы по всем сечениям ТВС, (б) – максимальный прогиб.

Рис. 8 отражает изменение прогибов ТВС с течением времени или ее искривление. Нарастание прогибов с течением времени подтверждает влияние релаксационных процессов, протекающих в элементах ТВС, на изменение жесткости конструкции ТВС.

На Рис. 9 представлены эффекты проскальзывания твэлов.

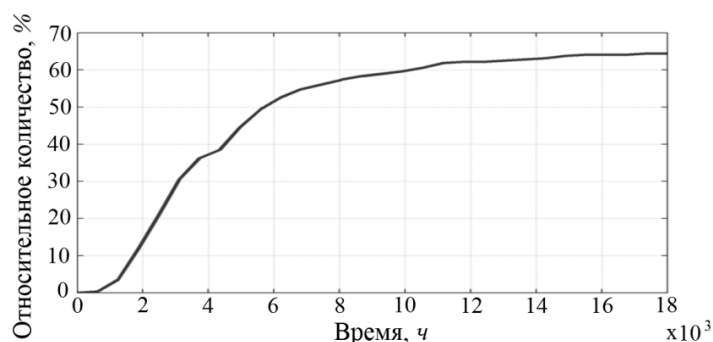


Рис. 9. Зависимость относительного числа твэлов в состоянии проскальзывания от времени

Анализ Рис. 8 (б) и Рис. 9 показывает, что наблюдается корреляция между изменением максимального прогиба ТВС и относительным числом твэлов в состоянии проскальзывания, что подтверждает влияние проскальзывания на изменение искривления ТВС с течением времени.

Следует отметить, что причинами проскальзывания твэлов является совокупность факторов, среди которых: неодинаковый радиационный рост твэлов и НК, осевое воздействие пружинного блока ТВС и наличие релаксационных процессов в ТВС. Все эти факторы, влияют на условие проскальзывания твэлов в ячейках ДР, сформулированное в виде системы уравнений (9).

Таким образом, удовлетворительное совпадение расчетных и экспериментальных данных подтверждают достоверность разработанной методики расчета релаксационной стойкости ТВС, а программная реализация методики позволяет для конкретной конструкции ТВС определять параметры напряженно-деформированного состояния: прогибы и изменение деформаций и напряжений в твэлах, НК с течением времени.

### **Основные результаты и выводы**

1) Разработана методика расчета релаксационной стойкости тепловыделяющей сборки, учитывающая ползучесть основных компонентов сборки, релаксацию напряжений в нагруженных узлах сборки, позволяющая определять напряженно-деформированное состояние ТВС и проскальзывание твэлов во времени.

2) Разработаны алгоритм и программа на основе методики расчета, зарегистрированные в отделе регистрации программ для ЭВМ ФГУ ФИПС, позволяющие получать результаты и исследовать напряженно-деформированное состояние ТВС различных конструкций.

3) Установлено, что искривление ТВС возникает при воздействии на нее только осевой силы пружинного блока и при наличии эксцентриситета ее точки приложения относительно геометрической оси ТВС.

4) В результате работы расчетной программы, установлено, что проскальзывание твэлов, возникающее вследствие релаксации контактного взаимодействия между твэлами и ДР, существенно влияет на изменение жесткости конструкции ТВС.

5) Разработаны методика, программа и алгоритм верификации констант в законе ползучести, позволяющие численно определять оптимальные константы с использованием различных экспериментальных данных.

6) Проведены эксперименты на релаксацию контактного взаимодействия между твэлами и дистанционирующими решетками, в результате которых было подтверждено наличие релаксационных процессов и количественно определены характеристики ползучести циркониевого сплава Э110.

### **Список публикаций по теме диссертации**

1. Гусев М.П., Данилов В.Л. Анализ релаксации контактной силы в соединении ТВЭЛа и дистанционирующей решетки тепловыделяющей сборки ВВЭР // Известия высших учебных заведений. Машиностроение, 2016. Вып. 1 (670). С. 12-17. (0.63 п.л. / 0.43 п.л.).

2. Гусев М.П., Данилов В.Л. Анализ эксцентриситета силы пружинного блока тепловыделяющей сборки // Известия высших учебных заведений. Машиностроение, 2013. Вып. 6 (639). С. 12-16. (0.57 п.л. / 0.46 п.л.).

3. Гусев М.П., Данилов В.Л. Релаксация пружин головной части тепловыделяющей сборки // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Машиностроение, 2012. Спец. вып. 6. С. 139-147. (0.46 п.л. / 0.32 п.л.).



4. Гусев М.П., Данилов В.Л. Экспериментальное исследование релаксации контактного взаимодействия тепловыделяющего элемента и ячейки дистанционирующей решетки // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2014. Вып. 10 (655). С. 64-69. (0.34 п.л. / 0.22 п.л.).

5. Гусев М.П., Данилов В.Л., Яковлев В.Ю. Определение времени полной релаксации контактного взаимодействия между оболочкой ТВЭЛ и упругим элементом дистанционирующей решетки в тепловыделяющей сборке реактора ВВЭР // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Машиностроение, 2015. Вып. 5 (104). С. 61–70. (0.41 п.л. / 0.29 п.л.).

6. Гусев М.П., Данилов В.Л. Метод расчета релаксации контактного взаимодействия между тепловыделяющим элементом и ячейкой дистанционирующей решетки // Наука и образование. Электрон. журн., 2013. Вып. 10. DOI: 10.7463/1013.0654596 (0.28 п.л. / 0.16 п.л.).

7. Гусев М.П., Данилов В.Л. Релаксационная стойкость винтовой цилиндрической пружины в условиях нейтронного облучения [Электронный ресурс] // Наука и образование. Электрон. журн., 2012. Вып. 4. URL: <http://technomag.edu.ru/doc/402924.html> (дата обращения 08.07.2013) (0.34 п.л. / 0.21 п.л.).

8. Gusev M.P., Danilov V.L. Creep inverse problem of the power reactor fuel assembly elements contact interaction // Applied Mechanics and Materials. 2015. Vol. 698. P. 643-648. (0.34 п.л. / 0.22 п.л.).

9. Гусев М.П., Данилов В.Л. Анализ зависимостей для радиационного закона ползучести циркониевого сплава Э110 // 7-я международная научно-инновационная молодежная конференция: Материалы НТК. Тамбов: ТСТГУ, 2015. С. 359-361. (0.12 п.л. / 0.08 п.л.).

10. Гусев М.П., Данилов В.Л. Анализ факторов, влияющих на релаксационную стойкость тепловыделяющей сборки // 5-я международная научно-инновационная молодежная конференция: Материалы НТК. Тамбов: ТСТГУ, 2013. С. 259-261. (0.12 п.л. / 0.09 п.л.).

11. Гусев М.П., Данилов В.Л. Влияние продольной деформации ТВЭЛ на релаксацию контактного взаимодействия между ТВЭЛом и упругим элементом дистанционирующей решетки ТВС ВВЭР // VI-я международная конференция. Проблемы механики современных машин: Материалы НТК. Улан-Удэ: ВСГУТУ, 2015. Т. 1. С. 62-68. (0.28 п.л. / 0.21 п.л.).

12. Гусев М.П., Данилов В.Л. Математическая модель задачи релаксации контактного взаимодействия между тепловыделяющим элементом и ячейкой дистанционирующей решетки // 12-я всероссийская с международным участием школа семинар по структурной макрокинетике: Тез. докл. НТК. Черногловка: ИСМАН РАН, 2014. С. 76-78. (0.12 п.л. / 0.09 п.л.).

13. Гусев М.П., Данилов В.Л. Математическое моделирование деформированного состояния тепловыделяющей сборки реакторов ВВЭР // Всероссийская научно-техническая конференция. Механика и математиче-

ское моделирование в технике: Тез. докл. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2016. С. 241-244. (0.12 п.л. / 0.08 п.л.).

14. Гусев М.П., Данилов В.Л. Методика определения оптимальных параметров в законе ползучести // 6-я международная научно-инновационная молодежная конференция: Материалы НТК. Тамбов: ТСТГУ, 2014. С. 288-290. (0.17 п.л. / 0.09 п.л.).

15. Гусев М.П., Данилов В.Л. Методика расчета деформирования тепловыделяющей сборки ВВЭР в реакторных условиях // 13-я всероссийская с международным участием школа семинар по структурной макрокинетике: Тез. докл. НТК. Черногловка: ИСМАН РАН, 2015. С. 46-49. (0.18 п.л. / 0.11 п.л.).

16. Гусев М.П., Данилов В.Л. Метод решения задачи контактного взаимодействия между тепловыделяющим элементом и узлом дистанционирующей решетки // 11-я всероссийская с международным участием школа семинар по структурной макрокинетике: Тез. докл. НТК. Черногловка: ИСМАН РАН, 2013. С. 33-36. (0.12 п.л. / 0.07 п.л.).

17. Гусев М.П., Данилов В.Л. Обратная задача ползучести при контактом взаимодействии элементов тепловыделяющей сборки энергетического реактора // I международная научная конференция молодых ученых. Электротехника. Энергетика. Машиностроение: сб. науч. тр. в 3 ч. Новосибирск: Изд-во НГТУ., 2014. Ч. 2. С. 225-227. (0.12 п.л. / 0.08 п.л.).

18. Гусев М.П., Данилов В.Л. Релаксация контактного взаимодействия между тепловыделяющим элементом и ячейкой дистанционирующей решетки // X-я международная школа-семинар «Проблемы оптимизации сложных систем»: Труды НТК. с. Булан-Соготту: Институт теоретической и прикладной математики НАН КР, 2014. С. 239-244. (0.23 п.л. / 0.12 п.л.).

19. Гусев М.П. Исследование релаксации напряжений в пружине, находящейся в условиях нейтронного облучения // 9-я всероссийская с международным участием школа семинар по структурной макрокинетике: Тез. докл. НТК. Черногловка: ИСМАН РАН, 2011. С. 119-120. (0.11 п.л.).

20. Гусев М.П. Испытания на ползучесть и длительную прочность: методические указания по курсам «Теория пластичности и ползучести», «Основы теории пластичности и ползучести», «Прикладная теория пластичности и ползучести» / под ред. В.Л. Данилова. М: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2015. 45 с. (3 п.л.).

21. Гусев М.П. Релаксационная стойкость пружинного блока в условиях высокой температуры и флакса нейтронов // 10-я всероссийская с международным участием школа семинар по структурной макрокинетике: Тез. докл. НТК. Черногловка: ИСМАН РАН, 2012. С. 14-17. (0.11 п.л.).

22. Свидетельство Гос. рег. программы для ЭВМ №2016615559. Расчет деформированного состояния тепловыделяющей сборки реактора ВВЭР в условиях высокой температуры и нейтронного облучения / Гусев М.П., Данилов В.Л. Москва. 2016.