

РАСЧЕТ ТВЭЛ НА РАСТЯЖЕНИЕ В ПП «ЛОГОС-ПРОЧНОСТЬ»

Путилин А.К.¹, Попов Т.А.², Селиваникова О.В.³

¹ ТПУ, ИЯТШ, гр. 0А11, e-mail: akp6@tpu.ru

² ТПУ, ИЯТШ, гр. 0А11, e-mail: tap17@tpu.ru

³ ТПУ, ИЯТШ, ОЯТЦ, ст.преподаватель, e-mail: selov@tpu.ru

Введение

В современной ядерной энергетике топливные элементы (ТВЭЛ) играют ключевую роль в обеспечении безопасной и эффективной работы ядерных реакторов. Они представляют собой сердечники из ядерного топлива, заключённые в оболочку, которая защищает от радиационного воздействия и механических повреждений. Конструкция и характеристики ТВЭЛ напрямую влияют на безопасность, эффективность и экономическую целесообразность ядерных реакторов.

Одним из важнейших этапов разработки и совершенствования ТВЭЛ является моделирование их поведения в различных условиях. Это позволяет оценить их прочность, долговечность и другие важные характеристики. Для этого используются специализированные программные комплексы, такие как «Логос-Прочность».

Программный пакет «Логос-Прочность» представляет собой мощный инструмент для моделирования поведения ТВЭЛ в различных условиях. Он позволяет решать широкий спектр задач, связанных с анализом прочности, устойчивости и долговечности конструкций.

Целью представленной работы является изучения возможности использования ПП «ЛОГОС-ПРОЧНОСТЬ» для расчёта прочностных характеристик ТВЭЛ реактора ВВЭР.

Основная часть

Одной из самых актуальных тем в атомной энергетике до сих пор остается обеспечение работоспособности ТВЭЛ. ТВЭЛ (тепловыделяющие элементы) — важнейший элемент активной зоны ядерного реактора. От их конструкции и качества во многом зависят безопасность и эффективность работы атомной электростанции. В данной статье рассматривается тема моделирования ТВЭЛ с помощью программного пакета «Логос-Прочность» на примере реактора ВВЭР и изучение их характеристик при растяжении.

Реактор ВВЭР — один из самых мощных и безопасных реакторов, используемых в атомной энергетике. Он имеет ряд преимуществ перед другими типами реакторов, таких как высокий уровень безопасности, эффективность и экономичность. Однако для обеспечения его безопасной и эффективной работы необходимо постоянно совершенствовать конструкции ТВЭЛ.

Конструкция и материалы ТВЭЛ определяются конструкцией реактора: гидродинамикой и химическим составом теплоносителя, температурными режимами, требованиями к нейтронному потоку. ТВЭЛ представляет собой герметичную трубку из циркония, легированного ниобием для увеличения пластичности. Герметичность оболочек должна сохраняться в течение всего срока работы ТВЭЛ в реакторе и последующего хранения отработавшего топлива до отправки на переработку. В связи с этим свойства материала оболочек ТВЭЛ должны удовлетворять требованиям коррозионной стойкости, прочности и пластичности в условиях нормальной работы и максимального разогрева в аварийных ситуациях. Температура плавления циркония около 1900 °С, при температуре выше 350 °С прочностные свойства ухудшаются. Толщина оболочки 0,65 мм, наружный диаметр трубки 9,1 мм. Длина ТВЭЛ 3800 мм, масса — 2,1 кг. Внутри располагаются таблетки из диоксида урана и пружина в верхней части, компенсирующая их тепловые перемещения.

Таблетки имеют плотность от 10,4 до 10,7 г/см³. Их наружный диаметр составляет 7,57 мм, а высота — 20 мм. В центре таблетки есть отверстие диаметром 1,2 мм, а края скошены фасками. Зазор между таблеткой и оболочкой, а также центральное отверстие предназначены для того, чтобы при радиационном распухании таблетки могли увеличиться в размере. Таблетки фиксируются в ТВЭЛ с помощью разрезных втулок.

Общая длина столба таблеток в ТВЭЛ составляет 3530 мм. Длина трубки ТВЭЛ равна 3800 мм, поэтому положение столба топливных таблеток в ТВЭЛ фиксируется разрезными втулками из нержавеющей стали и пружиной, которая компенсирует тепловые перемещения топлива.

Таблетки занимают 70% объёма внутри тепловыделяющего элемента, а остальное пространство занимают газы. При изготовлении в твэлы закачивают гелий под давлением от 20 до 25 кгс/см². В процессе эксплуатации к нему добавляются газообразные продукты деления, которые повышают давление внутри элемента до 50–80 кгс/см².

При работе на мощности средняя температура в центре таблеток составляет 1500–1600 °С, а на поверхности — около 470 °С. Тепловая энергия выделяется с интенсивностью 450 Вт/см³ в результате цепной реакции.

Все таблетки в твэле и обычно во всей ТВС имеют одинаковое обогащение, за исключением последних разработок, где в торцах есть 150 мм необогащённого урана.

В связи с ограниченными возможностями программного пакета «Логос-прочность» для разработки модели было принято следующее допущение:

1. для сокращения времени расчета в ПП «Логос», модель твэла упрощена до трех элементов: газ, топливо и оболочка.

Расчетная модель состоит из трех объемных конечных элементов.

В качестве оболочки используется модель цилиндра состоящего из упругого-пластического материала с билинейной диаграммой деформирования со следующими характеристиками:

1. начальная плотность $\rho_0=6,55$ г/см³;
2. модуль упругости $E=72,068$ ГПа;
3. коэффициент Пуассона $\nu=0,38$.

В качестве газа используется модель упругого изотропного материала со следующими характеристиками:

1. начальная плотность $\rho_0=0,00017847$ г/см³;
2. модуль упругости $E=0,041$ ГПа;
3. коэффициент Пуассона $\nu=0,38$.

В качестве топлива используется модель упругого изотропного материала со следующими характеристиками:

1. начальная плотность $\rho_0=10,97$ г/см³;
2. модуль упругости $E=226$ ГПа;
3. коэффициент Пуассона $\nu=0,3$.

В начальный момент времени к поверхности торца прикладывается сила $F=0$ Н и в течении 2 секунд возрастает до $F=1$ ГН в направлении оси Z. Второй торец закреплен.

Модель топлива представляет собой цилиндр; модель газа представляет собой трубу; модель оболочки представляет собой трубу, закрытую с концов заглушками. Габаритные характеристики приведены в таблице.

Таблица 1

Габаритные характеристики принятых моделей

Параметр	Значение
Модель топлива	
Радиус, мм	3,55
Длина, мм	3809
Модель газа	
Внутренний радиус, мм	3,55
Внешний радиус, мм	4,05
Длина, мм	3809
Модель оболочки	
Внутренний радиус, мм	4,05
Внешний радиус, мм	4,55
Длина, мм	3809
Толщина заглушки, мм	1
Радиус заглушки, мм	4,55

В начале работы необходимо создать компоненты для выбранных ранее моделей газа, оболочки и топлива, после чего создать тела (рис.1.).

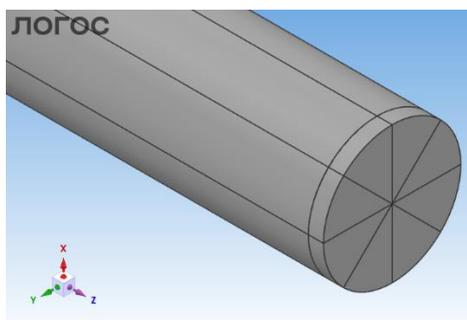


Рис. 1. Итоговые тела

Для каждого созданного тела необходимо установить сетку для дальнейшего моделирования. На следующем рисунке соответственно представлены сетки топлива, газа и оболочки (рис. 2).

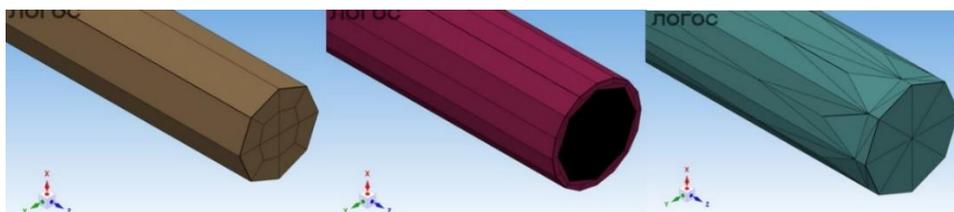


Рис. 2. Сетки тел

Далее по компонентам создаются подобласти, свойства подобластей и задаются материалы по их характеристикам. Также необходимо установить автоматический контакт на все подобласти.

На одном из концов оболочки создается набор точек, на которые будет действовать сила. На другом конце оболочки – аналогичный набор точек, которые будут закреплены.

Далее задается сила, приложенная к набору вдоль оси Z , и создается закрепление к другому набору точек по осям X, Y, Z (рис. 3, рис. 4):

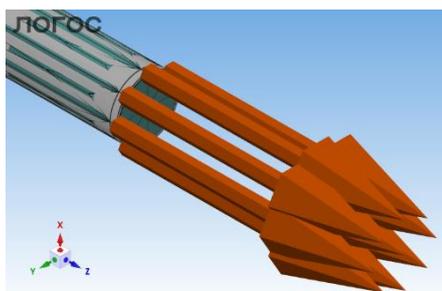


Рис. 3. Задание силы

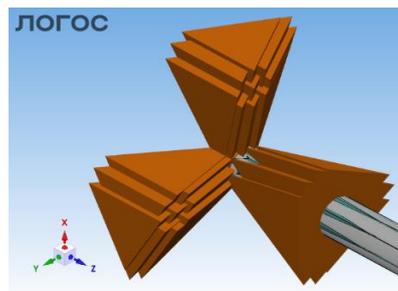


Рис. 4. Задание закрепления

Заключение

В представленной работе выполнено исследование возможности проектирования и изучения прочностных характеристик твэлов в ПП «ЛОГОС ПРОЧОСТЬ». На основе изученных характеристик создана упрощенная модель твэл в программном пакете «ЛОГОС-ПРОЧНОСТЬ», созданы начальные условия для расчета твэл на растяжение при нормальном режиме эксплуатации.

Список использованных источников.

1. Колпаков Г.Н., Селиваникова О.В. Конструкции ТВЭЛов, каналов и активных зон энергетических реакторов – Томск : Изд-во ТПУ, 2009. – С. 21–42.
2. Андрущечко С.А., Афров А.М., Васильев Б.Ю., Генералов В.Н., Косоуров К.Б., Семченков Ю.М., Украинцев В.Ф. АЭС с реактором типа ВВЭР-1000. От физических основ эксплуатации до эволюции проекта – Москва : Изд-во ЛОГОС, 2010. – С. 177–200.
3. Белозеров В.И., Жук М.М., Кузина Ю.А., Терновых М.Ю. Физика и эксплуатационные режимы реактора ВВЭР-1000 – Москва : Изд-во НИЯУ МИФИ, 2014. – С. 147–219.
4. Горшков А.Г., Трошин В.Н., Шалашилин В.И. Сопротивление материалов – Москва : Изд-во ФИЗМАТЛИБ, 2005. – С. 251–279.