

УДК 621.039  
П84

*Организаторы конференции:*  
Госкорпорация «Росатом»  
АО «НИКИЭТ»

**Прочность и надежность оборудования:** сб. докладов 10-го межотраслевого  
П84 семинара (17–20 октября 2017 г., Звенигород) – М.: Изд-во АО «НИКИЭТ», 2017. – 123 с.

ISBN 978-5-98706-113-8

*Основные направления работы семинара:* методы и критерии оценки прочности, долговечности и надежности конструкций, практика расчетного обоснования работоспособности и целостности конструкций, нормативное обеспечение работоспособности конструкций в современных условиях, экспериментальные исследования конструкционных материалов, соединений и элементов конструкций для обоснования прочности и продления ресурса до 60 и более лет эксплуатации, системы автоматизированного проектирования; практика проведения расчетных исследований с применением математического моделирования напряженно-деформированного состояния, повреждаемости, механики разрушения.

Для специалистов, занимающихся вопросами обоснования прочности и надежности конструкций.

Материалы включены в сборник без редактирования.

ISBN 978-5-98706-113-8

© Авторы тезисов, 2017  
© АО «НИКИЭТ», 2017  
© Издательство АО «НИКИЭТ», 2017

Детальное рассмотрение внешнего вида имитатора показывает, что имитатор после автоклавирования имеет светло-желтый оттенок за исключением одного наконечника и сварных соединений, которые имеют темный цвет (см. рис. 8).

Почернение наконечника связано с закреплением имитатора за него в установке нанесения покрытия и, как следствие, отсутствием на нем хромового покрытия.

В районе сварных соединений имеют место кольцевые почернения оболочки. За 72 часа автоклавирования (при стандартных для ускоренных коррозионных испытаний параметрах) образования белых продуктов коррозии циркониевого сплава Э110 на внешней поверхности имитатора визуально не обнаружено. Работы по определению коррозионной стойкости и структуры хромового покрытия после автоклавных испытаний будут продолжены.

### **Заключение**

1. Проведен выбор типа и метода нанесения защитного покрытия хрома на поверхность твэла. Изготовлены опытные образцы имитаторов твэлов с покрытием.

2. Проведены испытания по определению коэффициента трения и повреждаемости поверхности штатной оболочки и имитатора твэла с хромовым покрытием в условиях имитирующих сборку ТВС. Определено, что при взаимодействии с пуклевками ДР при нагрузке, характерной для условий сборки пучка твэлов, коэффициент трения имитатора с хромовым покрытием в 1,9 раз меньше, чем штатной оболочки. При этом существенно снижается повреждаемость оболочки.

3. Проведены ускоренные автоклавные испытания имитатора с хромовым покрытием. Видимых отслоений покрытия и образования белых продуктов коррозии циркониевого сплава Э110 на внешней поверхности имитатора не обнаружено.

4. При использовании покрытия хрома на поверхности твэлов ожидаются дополнительные технические и экономические эффекты. Необходимо продолжить исследования свойств предложенного защитного покрытия в условиях сборки ТВС и штатной эксплуатации.

### **Литература**

1. Соколова И.Д. Разработка новых видов уранового топлива для LWR // Атомная техника за рубежом. 2016. № 5.

2. Савченко А. Толерантное топливо для реакторов типа ВВЭР. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.proatom.ru/modules.php?name=News&file=article&sid=6531> (дата обращения: 01.02.2016).

3. Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. ПНАЭ Г-7-002-86. М.: Энергоатомиздат, 1989.

## **ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА УСТАНОВКИ СТУПЕНЧАТОЙ ПРУЖИНЫ-ФИКСАТОРА В ТВЭЛ**

*В.П. Мымченко, Д.О. Сердюк  
(ПАО «Машиностроительный завод», Электросталь)*

### **Введение и постановка задачи**

Ступенчатая пружина-фиксатор (далее фиксатор) используется в большинстве твэлов энергетических реакторов российского производства. Фиксатор располагается в компенсационном объеме твэла и обеспечивает неразрывность топливного столба при транспортно-технологических операциях.

Фиксатор имеет витки фиксирующей и компенсирующей части, между которыми расположен переходной виток. Витки фиксирующей части имеют наружный диаметр больший внутреннего диаметра оболочки твэла, за счет чего обеспечивается фиксация фиксатора

в оболочке. Витки компенсирующей части имеют меньший диаметр и обеспечивают поджатие топливного столба не менее 1,2 его веса.

После установки ТВС в реактор запас хода витков компенсирующей части до полного сжатия должен быть достаточным для обеспечения возможности термического и радиационного роста топливного столба.

Установка фиксатора в твэл производится двухступенчатым штоком, упирающегося в два плотно сжатых витка с диаметром, равным или меньшим диаметру витков компенсирующей части.

Работы, ведущиеся по реактору БРЕСТ, ставят актуальную задачу проектирования и исследования технологических и рабочих параметров нового фиксатора входящего в состав макета твэла ТВС периферийной зоны ректора.

В настоящее время проектирование фиксаторов выполняется по отработанной аналитической методике, позволяющей исследовать напряженное состояние витков фиксатора, как в компенсирующей, так и в фиксирующей его части, а также определять усилие установки и начальное усилие поджатия с учетом отскока витков фиксатора. Однако величина отскока является заданным параметром, подобрать который позволяет многолетний опыт проектирования и результаты экспериментов.

В связи с этим новизна настоящей работы заключается в исследовании механизма отскока витков фиксатора, и анализе вклада деформирования витков фиксирующей части и переходного витка на его величину, а также анализе напряженно-деформированного состояния этих витков и оболочки твэла при их совместном деформировании.

На сегодняшний день специалистами ПАО «МСЗ» разработана конструкторская документация для фиксатора входящего в состав макета твэла ТВС периферийной зоны ректора БРЕСТ, а также проведены аналитические и численные расчетные исследования.

Целью настоящей работы – расчетное исследование механизма отскока витков фиксатора и анализ напряженно-деформированного состояния фиксатора и оболочки твэла.

## Исходные данные

Объектом исследования является фиксатор, установленный в оболочку твэла (рис. 1).

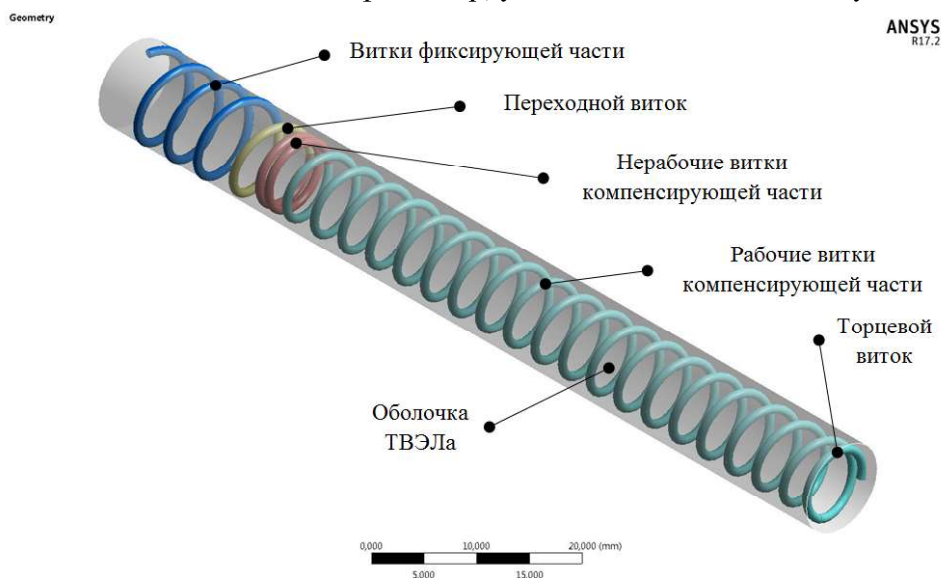


Рис. 1. Фиксатор в оболочке твэла

Фиксатор для макета твэла ТВС периферийной зоны реактора БРЕСТ имеет витки фиксирующей части, переходной виток, нерабочие витки компенсирующей части и рабочие витки компенсирующей части. Изготавливается фиксатор из проволоки  $\phi$  0,9 мм. Материал проволоки ЭК173-ИД со степенью деформации 50 % по ТУ 14-131-983-2001. Оболочка твэла – труба  $\phi$  10,5×9,5 вн. выполненная из стали ЭП-823-Ш по 8009.00.020 ТУ.

Основные конструктивные параметры фиксатора и оболочки твэла, принятые в расчете, приведены в табл. 1. Параметры, представленные в табл. 1, соответствуют варианту, при котором между фиксатором и оболочкой твэла реализуется минимальный натяг. Все конструктивные параметры фиксатора взяты по среднему значению, за исключением наружного диаметра витков фиксирующей части (данный параметр принят минимальным). Минимальной является и толщина оболочки твэла.

Физико-механические свойства материалов фиксатора и оболочки твэла принятые в расчете при температуре 20 °С сведены в табл. 2.

Таблица 1

**Основные конструктивные параметры, мм**

Конструктивные параметры фиксатора	
Длина фиксатора	90
Наружный диаметр витков фиксирующей части	9,68
Наружный диаметр витков компенсирующей части	8,29
Конструктивные параметры оболочки	
Наружный диаметр оболочки	10,2
Внутренний диаметр оболочки	9,53

Таблица 2

**Физико-механические свойства**

Конструктив	Фиксатор	Оболочка
Материал	ЭК173-ИД	ЭП-823-Ш
Модуль упругости первого рода, ГПа	176,8	240,6
Модуль упругости второго рода, ГПа	68	92,538
Коэффициент Пуассона	0,3	0,3
Временное сопротивление, МПа	1400	735
Предел текучести, МПа	—	588
Относительное удлинение при разрыве, %	1	12

Прочность оболочки твэла оценивалась по номинальному допускаемому напряжению:

$$[\sigma] = \min \left\{ \frac{R_m^T}{n_m}; \frac{R_{p0,2}^T}{n_{0,2}} \right\}, \quad (1)$$

где  $R_m^T$  – минимальное значение временного сопротивления при расчетной температуре,  $R_{p0,2}^T$  – минимальное значение предела текучести при расчетной температуре,  $n_m$  – коэффициент запаса прочности по временному сопротивлению,  $n_{0,2}$  – коэффициент запаса прочности по пределу текучести.

Прочность фиксатора оценивалась по допускаемому касательному напряжению, определяемому по формуле

$$[\tau] = 0,5 R_m^T. \quad (2)$$

Допускаемые напряжения, полученные по формулам (1–2) при  $n_m = 2,6$ ,  $n_{0,2} = 1,5$  сведены в табл. 3.

## Допускаемые напряжения

Конструктив	Фиксатор	Оболочка
Номинальное допускаемое напряжение, МПа	—	283
Допускаемое касательное напряжение, МПа	700	—

## Описание расчетной модели

Численное моделирование процесса установки в оболочку твэла фиксатора выполнено методом конечных элементов в программном комплексе ANSYS Mechanical R17.2 в среде Workbench. Трехмерная многоступенчатая нелинейная контактная задача решена в упругой постановке с использованием балочных, оболочечных и контактных конечных элементов.

Моделирование процесса выполнено за 5 шагов. На первом шаге был реализован натяг между оболочкой твэла и витками фиксирующей части фиксатора. На втором и третьем шаге дано смещение нерабочих витков фиксатора суммарно на 10 мм, что позволило растянуть витки фиксирующей части и занять им естественное положение в оболочке твэла. На четвертом шаге выполнено полное сжатие витков компенсирующей части. На завершающем пятом шаге реализован отскок фиксатора.

Расчетная модель представлена на рис. 2. Торцы участка оболочки твэла зафиксированы по шести степеням свободы. К нерабочим виткам компенсирующей части фиксатора задано перемещение отличное от нуля в направлении оси  $OX$ . Перемещения в направлении других осей нулевые. На торцевой виток компенсирующей части фиксатора задано нулевое перемещение во всех направлениях с целью имитации контакта с таблеткой. Коэффициент трения между фиксатором и оболочкой твэла принят равный 0,1. Конечно-элементная модель представлена на рис. 3 а, б.

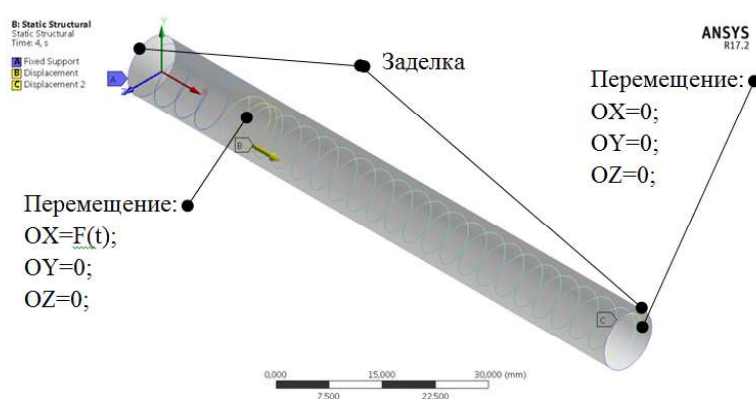
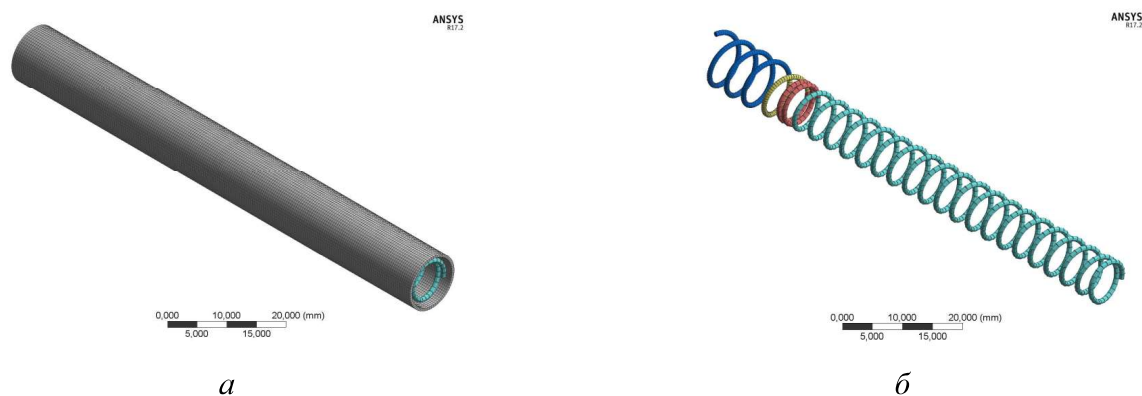


Рис. 2. Расчетная модель

Рис. 3. Конечно-элементная модель:  
а – вид на оболочку твэла; б – вид на фиксатор

Конечно-элементная модель состоит из 15 260 элементов. Оболочка твэла моделировалась оболочечными элементами типа SHELL181, фиксатор – балочными элементами типа BEAM188. Контакты моделировались элементами типа CONTA174. В качестве ответных контактных элементов использовались элементы TARGE170. Конечные элементы имеют линейную функцию формы.

### Основные результаты

Процесс установки фиксатора в оболочку твэла представлен на рис. 4а–4д в виде распределения перемещений по фиксатору в направлении оси  $OX$  в конце каждого шага.

В результате анализа результатов, представленных на рис. 4а–4д установлено, что отскок фиксатора происходит за счет сжатия переходного витка и первого после него витка фиксирующей части. При отскоке в 6,3 мм вклад переходного витка на суммарный отскок составил 66 %, а соответствующего витка фиксирующей части 34 %. Кроме того было установлено, что максимальное усилие установки фиксатора составило 21,1 Н, а начальное усилие поджатия (после выемки штока) 16,8 Н.

Распределение эквивалентных напряжений по теории прочности Галилея в витках фиксатора при его установке представлено на рис. 5.

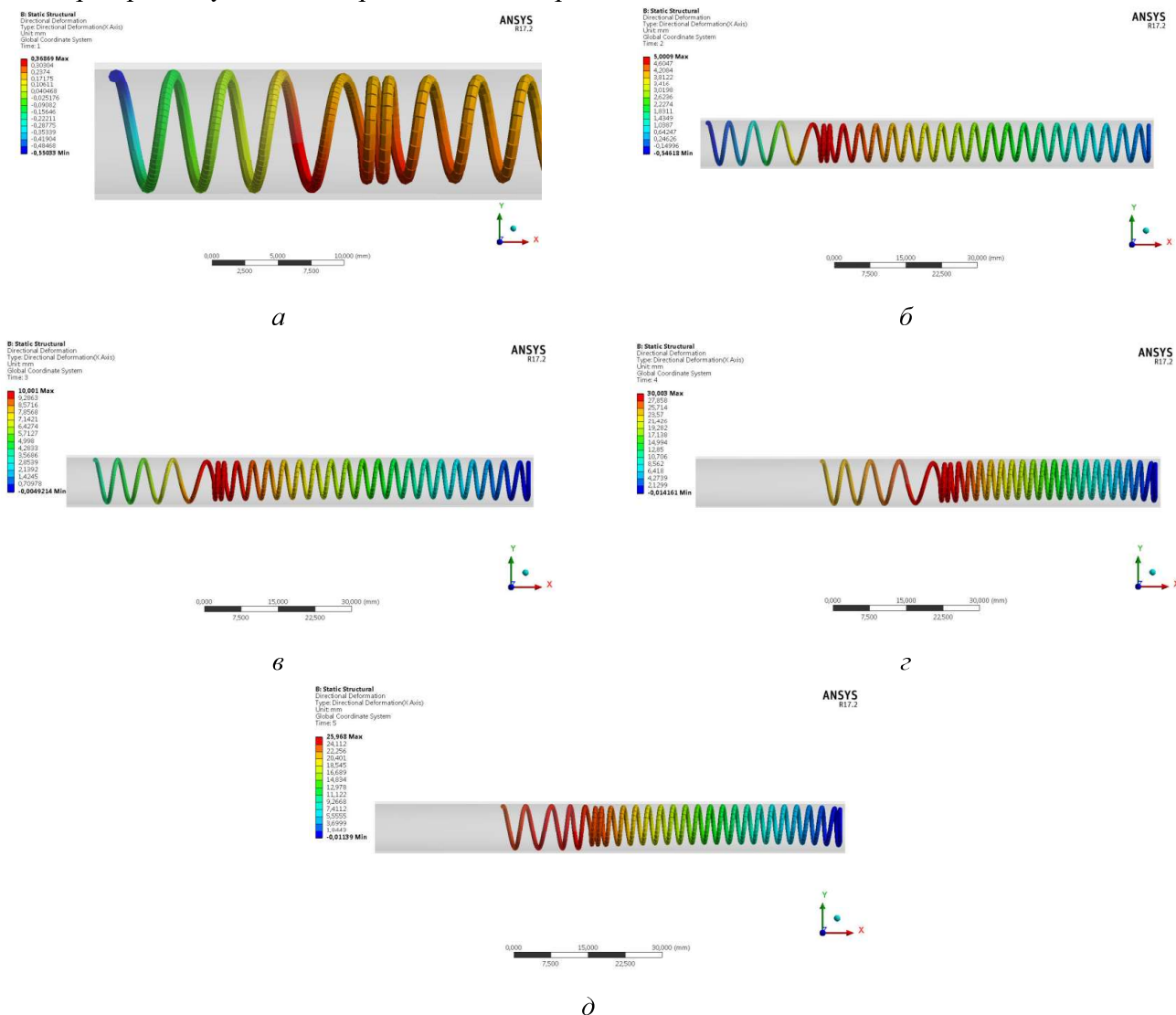


Рис. 4. Перемещения фиксатора в направлении оси  $OX$ :

- а) конец первого шага – реализация натяга;
- б) конец второго шага – растяжение витков фиксирующей части;
- в) конец третьего шага – растяжение витков фиксирующей части;
- г) конец четвертого шага – полное сжатие витков компенсирующей части;
- д) конец пятого шага – реализация отскока

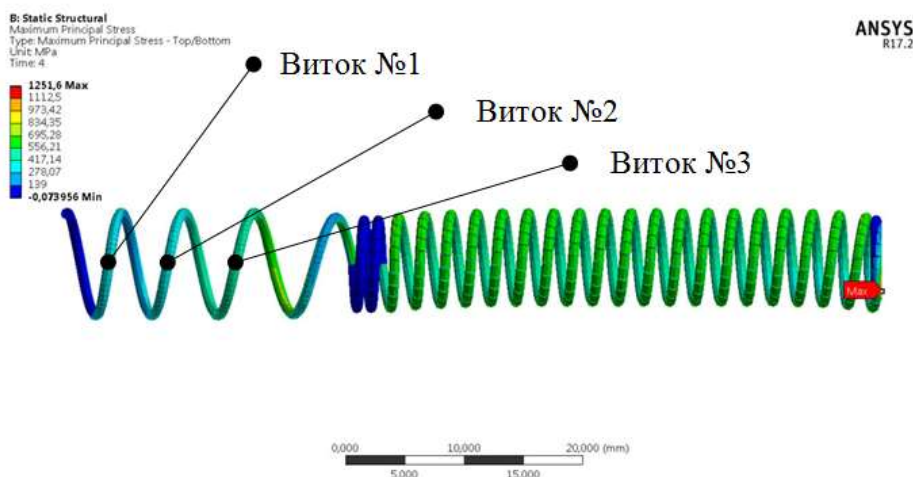


Рис. 5. Эквивалентные напряжения

Так как согласно конструкторской документации нерабочие витки компенсирующей части фиксатора навиваются с зазором не более 0,3 мм, то для предотвращения решения контактной задачи, в случае их соприкосновения, между ними были заданы дополнительные балочные элементы предотвращающие касание витков. В связи с этим в нерабочих витках компенсирующей части наблюдаются напряжения близкие к нулю. Максимальные эквивалентные напряжения 1251,6 МПа, наблюдаемые в торцевом витке, вызваны приятым граничным условием взамен решения контактной задачи фиксатор-таблетка, вследствие чего не несут смысловой нагрузки.

Основные результаты расчета сведены в табл. 4.

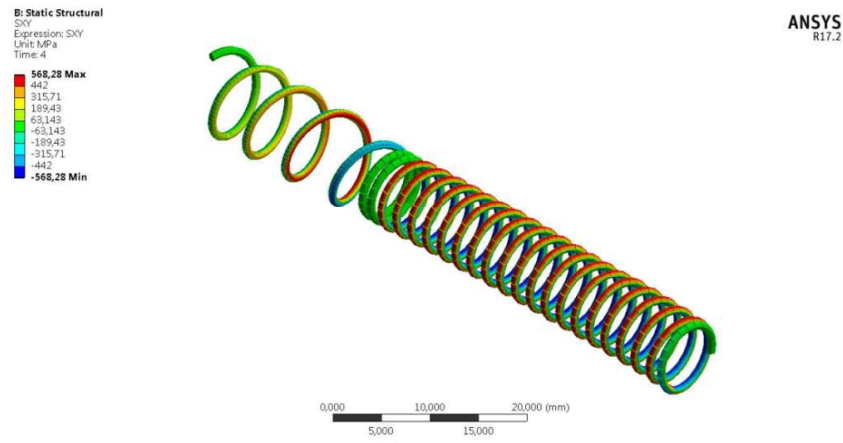
Таблица 4

**Максимальные эквивалентные напряжения**

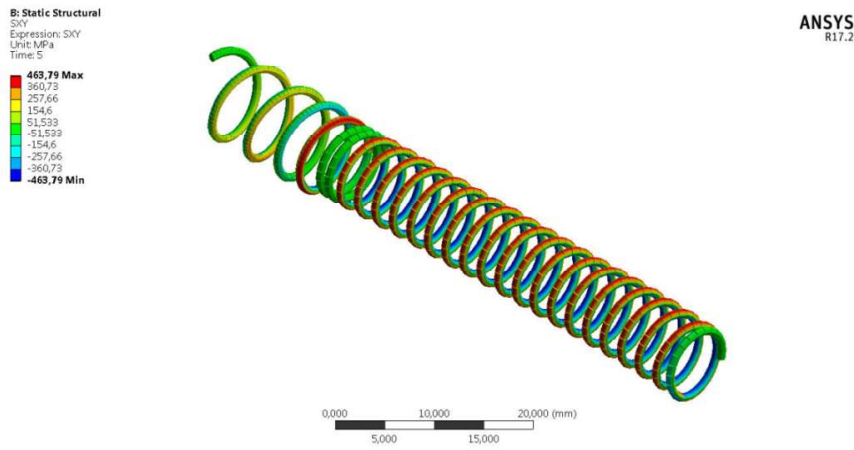
Участок фиксатора	Максимальные эквивалентные напряжения, МПа
Виток № 1 фиксирующей части	425
Виток № 2 фиксирующей части	450
Виток № 3 фиксирующей части	550
Переходной виток	900
Рабочие витки компенсирующей части	700

По результатам, представленным на рис. 5 и в табл. 4, видно, что эквивалентные напряжения в витках компенсирующей части распределены равномерно и максимальное их значение достигает 700 МПа. Эквивалентные напряжения в витках компенсирующей части распределены с небольшим возрастанием от первого витка к третьему. Напряжения в переходном витке достигают 900 МПа.

На рисунках б а, б представлены распределения касательных напряжений в фиксаторе при установке и после выемки штока.



*a*



*б*

Рис. 6. Касательные напряжения в фиксаторе при установке (а) и после выемки штока (б)

Из рисунка 6 а, б видно, что максимальные касательные напряжения при установке фиксатора наблюдаются в витках компенсирующей части и достигают значения 568 МПа. В витках фиксирующей части, в частности в переходном витке, касательные напряжения достигают 546 МПа. После выемки штока напряжения падают. Так в витках компенсирующей части фиксатора напряжения опускаются до 445 МПа, а в фиксирующей части – до 464 МПа. Основные результаты расчета сведены в табл. 5.

Таблица 5

**Максимальные касательные напряжения**

Участок фиксатора	Максимальные касательные напряжения, МПа
При установке фиксатора	
Переходной виток	546
Рабочие витки компенсирующей части	568
После выемки штока	
Переходной виток	464
Рабочие витки компенсирующей части	445



Из таблицы 5 видно, что максимальные касательные напряжения при установке фиксатор возникают в витках компенсирующей части, а после выемки штока, в переходном витке. При этом максимальные касательные напряжения в витках фиксатора не превышают допустимых напряжений.

Анализ напряженно-деформированного состояния оболочки твэла показал, что напряжения достигают максимального уровня после выемки штока, в результате возрастания давления витков на оболочку твэла при их отскоке. На рисунке 7 представлено распределение эквивалентных напряжений по теории прочности Мизеса–Генки по внутренней поверхности оболочки твэла.

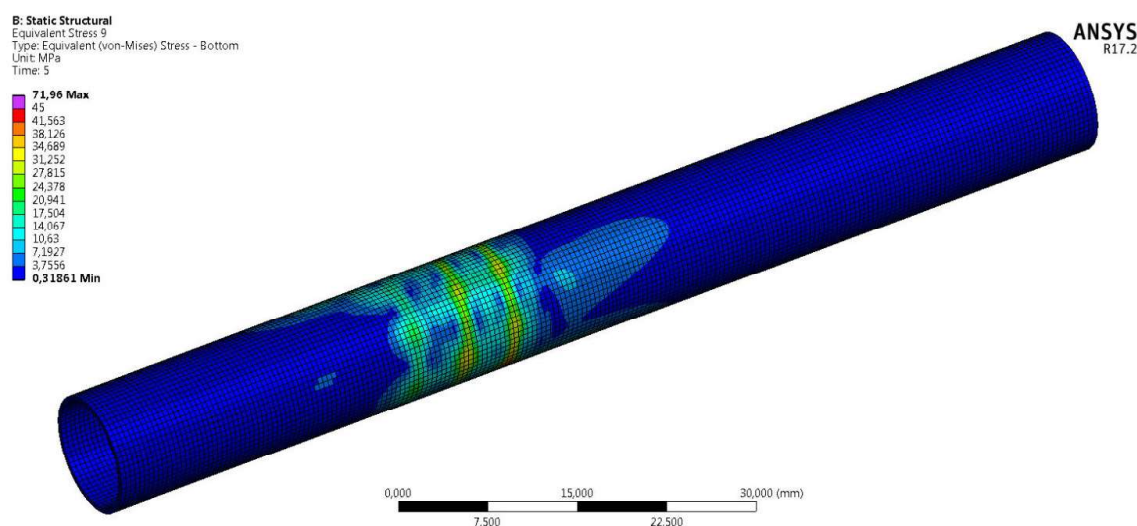


Рис. 7. Напряженно-деформированное состояние оболочки твэла

По результатам, представленным на рис. 7, видно, что максимальные напряжения достигают 45 МПа и сосредоточены они в зоне контакта витков фиксирующей части с оболочкой. При этом максимальные напряжения в оболочке существенно ниже допустимых напряжений.

Точечный скачок напряжений до 72 МПа обусловлен неточностью взаимодействия одной пары контактных элементов.

В качестве верификации полученных результатов при моделировании процесса установки фиксатора в оболочку твэла сравним их с результатами, полученными по аналитической методике, использованной при его проектировании (табл. 6).

Таблица 6

**Основные результаты расчетов**

Сопоставляемые параметры	Результаты аналитического решения	Результаты численного решения
Отскок, мм	4...8	6,3
Усилие установки, Н	17,4...26,4	21,1
Начальное усилие поджатия, Н	12,6...23,2	16,8
Максимальные касательные напряжения в компенсирующей части при установке, МПа	450...683	568
Максимальные касательные напряжения в фиксирующей части при установке, МПа	354...635	557
Максимальные касательные напряжения в компенсирующей части после установки, МПа	326...600	445

По результатам, представленным в табл. 6, видно, что величина отскока, усилие установки и начальное усилие поджатия фиксатора, полученные в результате численного моделирования, близки к среднему значению из диапазона решений по аналитической методике. Аналогичная ситуация и с касательными напряжениями.

В дальнейшем планируется верификация на основании экспериментальных данных после установки опытной партии фиксаторов в оболочки твэлов по штатной технологии.

## **Заключение**

1. Выполнено моделирование процесса установки фиксатора топливного столба в оболочку на примере твэла периферийной зоны ТВС реактора БРЕСТ.

2. Установлено, что наибольший вклад в отскок фиксатора после выемки штока вносит переходной виток, в меньшей степени влияют витки фиксирующей части фиксатора. При этом при минимальном натяге между витками фиксирующей части и оболочкой твэла вклад переходного витка составил 66 %.

3. Проведена оценка прочности фиксатора и оболочки твэла. Полученные результаты верифицированы по данным аналитического решения.

4. Планируются расчетные исследования процесса совместного деформирования фиксатора и циркониевой оболочки твэла при эксплуатации ТВС в реакторе.

## **РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СИСТЕМЫ «КОРПУС СТЕНДА – ФУНДАМЕНТ – ВИБРОАКТИВНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ»**

*И.Н. Базавлук, А.Б. Кравец, А.С. Лебедев (АО «ЦКБ МТ «Рубин», Санкт-Петербург)*

Такое нетрадиционное оборудование, как устройство гашения мощности (далее – УГМ) является источником интенсивной вибрации в широком диапазоне частот, что создает угрозу безопасной и надежной эксплуатации испытательного стенда при испытаниях (рис. 1).

Критерии оценки виброненадежности стенда:

- низшие частоты собственных колебаний (не ниже 35...40 Гц);
- характер амплитудно-частотного спектра отклика рамы стенда на импульсное воздействие: величины дискретных гармоник в рабочем диапазоне частот (не более чем у надежно работающего аналога).
- идентичность амплитудно-частотных спектров на корпусе УГМ (сопоставимость амплитуд на стенде-аналоге).

Для прогнозирования поведения колебательной системы «Корпус стенда-Фундамент-УГМ» на проектных режимах была проведена работа по верификации конечно-элементной модели стенда по результатам экспериментальных измерений жесткости стенда. Конечно-элементная модель создана при помощи программного комплекса ANSYS, экспериментальная оценка жесткости конструкции стенда проводилась измерением частотных откликов рамы стенда на ударное воздействие малой интенсивности.