

## РАСПУХАНИЕ НАПРАВЛЯЮЩИХ ГИЛЬЗ СТЕРЖНЕЙ СУЗ БЫСТРЫХ РЕАКТОРОВ В НЕОДНОРОДНЫХ ТЕМПЕРАТУРНЫХ И РАДИАЦИОННЫХ ПОЛЯХ

**С.И. Поролло, Ю.В. Конобеев, Ф.А. Гарнер\***

*ФГУП «ГНЦ РФ-ФЭИ» им. А.И. Лейпунского.*

*249033, Обнинск, Калужская обл., пл. Бондаренко, 1*

*\* Фирма «Консультации по влиянию облучения», Ричланд, штат Вашингтон, США*



Исследовались формоизменение и распухание направляющих гильз стержней СУЗ реакторов БН-350 и БОР-60 после отработки ими заданного ресурса. Измерение диаметра гильзы ТК реактора БН-350 по высоте АЗ после облучения проводилось в двух взаимно перпендикулярных положениях через 50 – 100 мм с точностью 0,1 мм. Размер гильзы АЗ реактора БОР-60 в различных сечениях по высоте АЗ измерялся по ребрам и посередине граней. Распухание материала гильз измерялось методом гидростатического взвешивания.

Исследования показали, что облучение направляющей гильзы стержня температурной компенсации (ТК) в реакторе БН-350 до максимальной повреждающей дозы 65 сна приводит к ее значительному искривлению (максимальная стрела прогиба 15 мм) и изменению диаметра. В районе центра АЗ в одном из направлений наблюдалось увеличение размера гильзы на 6%, а в перпендикулярном направлении – уменьшение размера на 2,4%.

Облучение направляющей гильзы стержня аварийной защиты (АЗ) реактора БОР-60 до максимальной дозы 120 сна приводит к значительному увеличению размера шестигранной трубы по ребрам и уменьшению размера шестигранника посередине грани.

Деформация направляющих гильз стержней СУЗ происходит в результате неоднородного распухания материала гильз (аустенитных нержавеющей сталей ЭП-150 и Х18Н9) по высоте, периметру и толщине стенки. Градиент распухания приводит к появлению в материале гильзы значительных внутренних напряжений, под действием которых в результате радиационной ползучести уменьшаются ее исходные размеры. Высокий уровень остаточных напряжений в сочетании с полным охрупчиванием может приводить к разрушению гильзы даже в отсутствие внешних нагрузок.

**Ключевые слова:** быстрый реактор, распухание, радиационная ползучесть, гильзы СУЗ, градиент температуры, повреждающая доза.

### ВВЕДЕНИЕ

Явление вакансионного распухания было открыто при исследовании оболочек твэлов реактора DFR [1]. В течение сравнительно короткого времени были определены основные закономерности этого явления [2, 3]. В частности, было установлено, что

© С.И. Поролло, Ю.В. Конобеев, Ф.А. Гарнер, 2015

распухание наблюдается в определенном температурном диапазоне с максимумом при промежуточной температуре, а основными факторами, определяющими величину распухания, являются температура облучения и флюенс нейтронов или повреждающая доза. Любой конструктивный элемент активной зоны быстрого реактора эксплуатируется в пространственно неоднородных температурных и радиационных полях. Так, например, флюенс нейтронов изменяется по высоте и радиусу активной зоны, температура облучения также изменяется по высоте активной зоны, по поперечному сечению твэла или ТВС и т.д. Уже в самом начале исследования твэлов реактора БР-5 была установлена окружающая неравномерность распухания оболочек периферийных твэлов ТВС, связанная с изменением температуры по их периметру [4]. Такая неравномерность распухания приводит к изгибу периферийных твэлов и появлению дополнительных напряжений в оболочке [5]. Градиент температуры по толщине стенки оболочки твэла вызывает появление соответствующего градиента распухания и, как следствие, возникновение на поверхности оболочки твэлов напряжений различных знаков [6, 7]. Изменение распухания по длине и периметру шестигранных чехлов ТВС, вызванное градиентами температуры и дозы, приводит к существенному искажению первоначальной формы ТВС, что значительно осложняет обращение с ними после облучения [8].

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследовались направляющие гильзы стержня температурной компенсации (ТК) реактора БН-350 и аварийной защиты (АЗ) реактора БОР-60. Гильза ТК представляет собой цилиндрическую трубу с наружным диаметром 84 мм и толщиной стенки 4 мм. В верхней части трубы на наружной ее части выполнен шестигранник для дистанционирования с окружающими ТВС. Нижний хвостовик имеет выступы для байонетного крепления в гнездах напорных коллекторов и дроссельное устройство для обеспечения требуемого расхода теплоносителя через стержень СУЗ. Для исследования в горячую лабораторию ГНЦ РФ-ФЭИ поступила часть цилиндрической трубы длиной 1 м, находящаяся в активной зоне. Гильза ТК была изготовлена из высоконикелевого сплава ЭП-150 (04X15H35M2БТЮР), химический состав которого приведен в табл. 1.

Таблица 1

### Химический состав высоконикелевого сплава ЭП-150, % вес [9]

C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	Nb	Ti	Al	B	Ce	S	P
≤0,10	≤0,8	≤0,7	15,0–17,0	34–38	2,0–2,5	0,9–1,3	0,7–1,1	0,9–1,3	≤0,004	≤0,02	≤0,02	≤0,025

Гильза аварийной защиты (АЗ) реактора БОР-60 представляла собой изготовленную из стали X18H9 шестигранную трубу размером под ключ 44 мм и внутренним цилиндрическим отверстием диаметром 42 мм. Химический состав стали X18H9 дан в табл. 2.

Таблица 2

### Химический состав стали X18H9, % вес [10]

C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Cu	Ti	Fe
≤0,10	≤0,80	≤2,0	≤0,02	≤0,025	17,0–19,0	8,0–10,0	≤0,30	≤0,1	Основа

Облучение гильзы ТК происходило в третьем ряду активной зоны реактора БН-350 в течение 370,3 эфф. сут. Максимальный флюенс нейтронов за время облучения составил  $1,52 \cdot 10^{23}$  нейтр./см<sup>2</sup> ( $E > 0,1$  МэВ), что соответствует повреждающей дозе 65 сна. По высоте активной зоны температура гильзы ТК менялась от 285 до 420°C.

Гильза АЗ эксплуатировалась в реакторе БОР-60 до максимального флюенса нейтронов  $2,3 \cdot 10^{23}$  нейтр./см<sup>2</sup> ( $E > 0,1$  МэВ), что соответствует повреждающей дозе 120 сна. Температура гильзы при этом менялась от 350 до 455°C.

Измерение диаметра гильзы ТК реактора БН-350 по высоте АЗ после облучения проводилось в двух взаимно перпендикулярных положениях через 50 – 100 мм с точностью 0,1 мм. Измерение размера гильзы АЗ реактора БОР-60 в различных сечениях по высоте АЗ проводилось по ребрам и посередине граней. Для измерения распухания материала гильзы ТК реактора БН-350 методом гидростатического взвешивания в пяти сечениях по высоте активной зоны были вырезаны образцы размером 55×10×4 мм. Схема вырезки и нумерация образцов приведена на рис. 1.

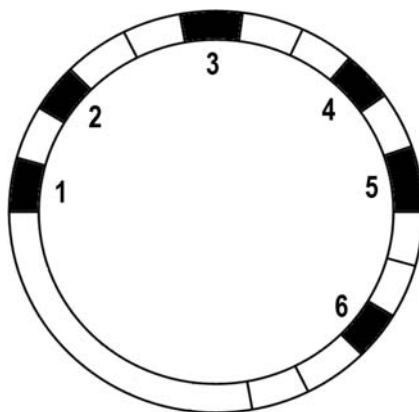


Рис. 1. Схема вырезки образцов для измерения плотности гильзы ТК реактора БН-350

Измерение плотности материала гильзы АЗ реактора БОР-60 проводилось на образцах весом 3 – 5 г, вырезанных из углов и середины граней. В качестве эталонов использовались образцы, вырезанные из необлученной части гильзы.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

### Гильза ТК реактора БН-350

При визуальном осмотре гильзы было установлено, что в районе активной зоны она имела значительное искривление и увеличение диаметра (рис. 2). Стрела прогиба гильзы на этом участке достигала 12 – 15 мм.

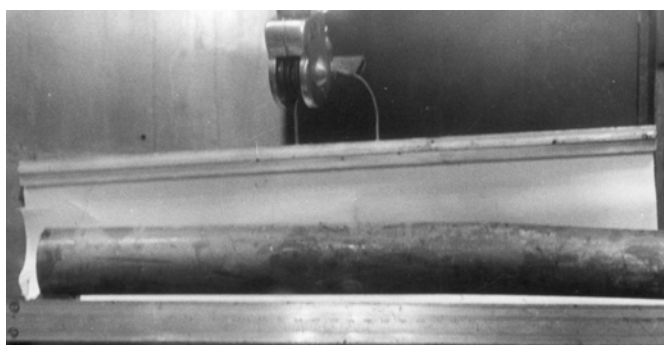


Рис. 2. Внешний вид части гильзы ТК реактора БН-350

Измерение диаметра гильзы ТК (рис. 3) показало, что в результате облучения произошло значительное изменение ее геометрии. При исходном диаметре гильзы, равном 84 мм, диаметр облученной гильзы в одном из направлений измерений в районе центра АЗ достигает 89 мм. При этом в перпендикулярном направлении на участке гильзы от – 250 до 50 мм от центра АЗ ее диаметр ниже исходного (82 мм на расстоянии 100 мм ниже центра АЗ).

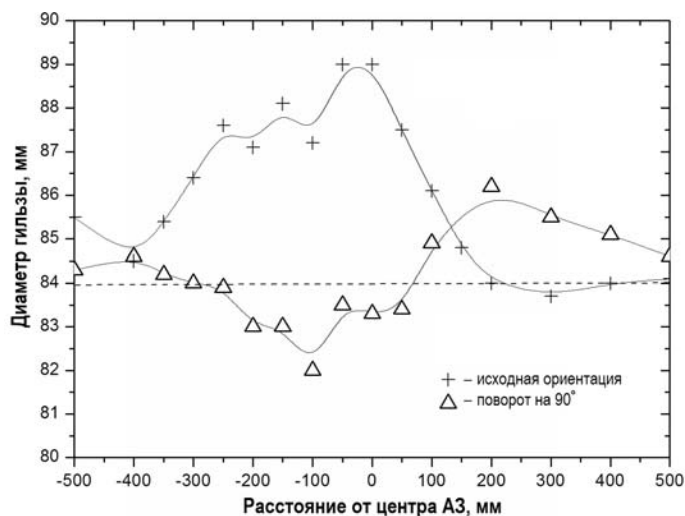


Рис. 3. Изменение диаметра гильзы ТК в двух взаимно перпендикулярных направлениях

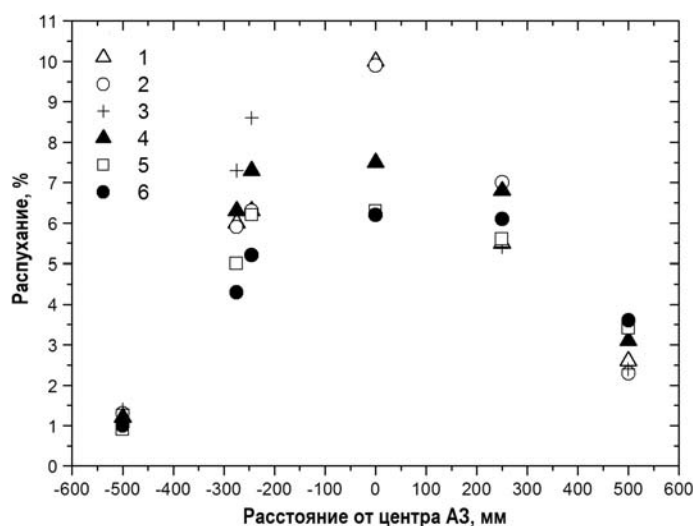


Рис. 4. Изменение распухания гильзы ТК по высоте и периметру, измеренное методом гидростатического взвешивания. Нумерация образцов соответствует рис. 1

Таблица 3

**Распухание (%) материала гильзы ТК реактора БН-350, измеренное методом гидростатического взвешивания**

№ сечения	Расстояние от центра АЗ, мм	Положение образцов по периметру (см. рис. 1)					
		1	2	3	4	5	6
I	500	2,6	2,3	2,5	3,1	3,4	3,6
II	250	5,5	7,0	5,4	6,8	5,6	6,1
III	0	10,0	9,9	—	7,5	6,3	6,2
IV	–245	6,3	6,3	8,6	7,3	6,2	5,2
IV <sup>a</sup>	–275	6,0	5,9	7,3	6,3	5,0	4,3
V	–500	—	1,3	1,4	1,2	0,9	1,0

Данные по распуханию материала гильзы ТК, полученные при измерении плотности методом гидростатического взвешивания, приведены на рис. 4 и в табл. 3, откуда следует, что распухание стали ЭП-150 значительно изменяется как по высоте, так и по периметру гильзы. Максимум распухания (10 %) наблюдается в центре АЗ ( $T_{\text{обл.}} = 350^\circ\text{C}$ , доза 65 сна), в верхнем и нижнем сечениях гильзы распухание материала не превышает 3,6 и 1,4 % соответственно. При этом наблюдается значительное изменение распухания по периметру гильзы. Например, в поперечном сечении гильзы в центральной плоскости АЗ величина распухания изменяется от 6,2 до 10 %. В других исследованных сечениях, за исключением самого нижнего, также наблюдался достаточно заметный градиент распухания по периметру гильзы.

#### Гильза АЗ реактора БОР-60

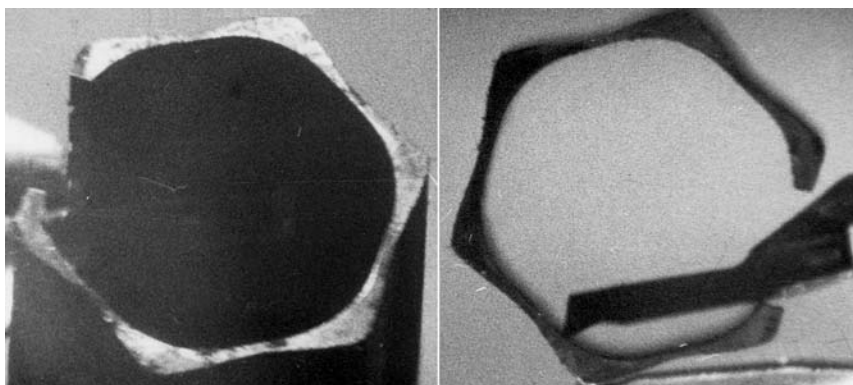


Рис. 5. Внешний вид поперечных сечений гильзы АЗ после облучения в реакторе БОР-60

Внешний осмотр гильзы АЗ реактора БОР-60 после облучения показал, что шестигранник в той части гильзы, которая находилась в активной зоне реактора, был подвержен заметному деформированию, в частности, явно заметен прогиб граней шестигранника внутрь (рис. 5). Результат осмотра подтверждается данными измерения линейных размеров гильзы (рис. 6).

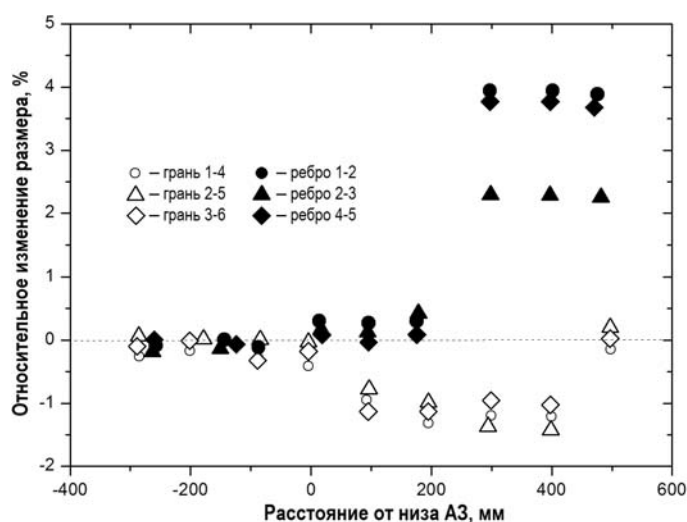


Рис. 6. Изменение относительных линейных размеров по длине гильзы АЗ реактора БОР-60 по граням и ребрам

Из рисунка видно, что максимальное увеличение размера гильзы по ребрам наблюдалось на расстоянии 400 мм от низа АЗ и достигало 4 %. Измерения размеров шестигранника посередине ребер показали, что на участке гильзы от 0 до 400 мм от

низа АЗ они ниже исходного.

Таблица 4

**Результаты определения плотности материала гильзы АЗ реактора БОР-60**

Расстояние от низа АЗ, мм	Температура облучения, °С	Флюенс нейтронов, н/см <sup>2</sup> (E>0,1 МэВ)	Изменение плотности, %		
			По ребру 1-2	По грани 2	По ребру 2-3
-480	350	$0,1 \cdot 10^{23}$	–	0,2	–
0	350	$1,7 \cdot 10^{23}$	–	0,2	–
50	365	$1,95 \cdot 10^{23}$	–	–0,5	–
100	380	$2,17 \cdot 10^{23}$	–	–0,6	–
150	395	$2,31 \cdot 10^{23}$	–4,8	–0,9	–2,9
200	410	$2,34 \cdot 10^{23}$	–	–4,8	–
250	425	$2,31 \cdot 10^{23}$	–9,3	–5,5	–11,6
300	440	$2,17 \cdot 10^{23}$	–	–6,0	–
350	455	$1,97 \cdot 10^{23}$	–0,9	–5,8	–8,5

В таблице 4 даны результаты определения распухания материала гильзы АЗ методом гидростатического взвешивания. Из данных таблицы следует, что максимальное распухание стали Х18Н9 наблюдалось в сечении гильзы на расстоянии 250 мм от низа АЗ, причем распухание материала гильзы в углах шестигранника приблизительно в два раза выше, чем в середине грани. В другом исследованном сечении гильзы (150 мм от низа АЗ) различие в распухании между ребрами и гранью еще выше.

### ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Направляющие гильзы СУЗ быстрого реактора являются важными элементами активной зоны, которые обеспечивают его безопасную эксплуатацию. Их разрушение или значительное изменение размеров может привести к заклиниванию стержней СУЗ, что, безусловно, является недопустимым. В работе было показано, что в результате облучения гильз СУЗ реакторов БОР-60 и БН-350, изготовленных из сталей аустенитного класса, произошло значительное искажение их первоначальной формы. При этом, что особенно важно, в обоих случаях наряду с существенным увеличением размера гильзы в одном направлении в другом направлении происходило уменьшение размеров ниже исходных. Полученные данные совпадают с данными работ [11, 12], в которых исследовались направляющие гильзы компенсирующих стержней реактора БОР-60. Одна из исследованных гильз была выгружена из реактора по причине заедания компенсирующего стержня. При внешнем осмотре в верхней части гильзы был обнаружен участок с сильно измененной формой: середины граней заметно вогнуты по сравнению с ребрами. Кроме того при проверке гильзы калибром, равным диаметру компенсирующего стержня, было обнаружено уменьшение ее проходного сечения.

Можно считать, что направляющие гильзы стержней СУЗ эксплуатируются в реакторе в свободном состоянии, т.е. прилагаемые к ним внешние нагрузки незначительны. Давление натрия в гильзе значительно ниже давления натрия в ТВС, поглощающие стержни свободно перемещаются внутри направляющей гильзы, не оказывая на нее значительного механического воздействия. В таком случае на начальном этапе облучения все формоизменение направляющих гильз будет определяться ее распуханием. Проведен-



ные исследования и данные работ [11 – 13] говорят о том, что распухание сложным образом изменяется по длине, периметру и толщине стенки направляющих гильз. Для шестигранных гильз реактора БОР-60 кроме этого наблюдается существенное различие в распухании между ребрами и серединой граней (см. табл. 4). Градиент распухания по толщине стенки гильзы обусловлен различием температур внешней и внутренней поверхностей гильзы, которое может достигать 75°C. Градиент распухания по периметру гильзы связан с окружной температурной неравномерностью, которая может быть вызвана либо неравномерным подогревом гильзы со стороны окружающих тепловыделяющих сборок, либо несоосным расположением поглощающего стержня внутри гильзы.

Появление градиента распухания приводит к возникновению внутренних напряжений в объеме гильзы, и с этого момента общая деформация будет определяться распуханием материала гильзы, которое в свою очередь будет зависеть от напряжения и деформации радиационной ползучести. Вследствие радиационной ползучести возникающие внутренние напряжения релаксируют до определенной величины, и, тем не менее, после окончания облучения в гильзах с большим градиентом распухания существует высокий уровень остаточных напряжений. В гильзе КС реактора БОР-60 это было измерено рентгеноструктурным методом [12], а высокий уровень остаточных напряжений в гильзе ТК реактора БН-350 разрушил ее при резке на фрезерном станке в горячей камере (рис. 7).

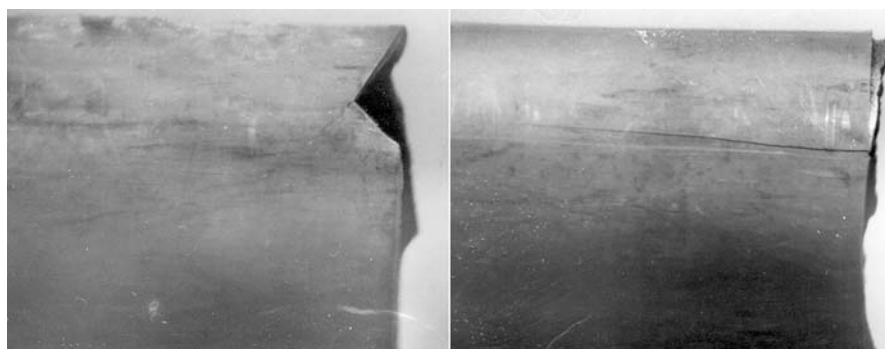


Рис. 7. Характерный вид разрушения гильзы ТК

Понятно, что распухание материала гильз само по себе не может приводить к уменьшению исходных размеров изделия. При распухании увеличивается каждый из размеров. Уменьшение некоторых размеров гильз по сравнению с исходными возможно лишь в случае действия радиационной ползучести. При определенных условиях в результате возникновения в конструкции значительных внутренних напряжений могут возникать силы или моменты сил, действие которых может приводить к размерным изменениям такого рода.

## ВЫВОДЫ

На основании проведенных исследований формоизменения и распухания направляющих гильз стержней СУЗ реакторов БН-350 и БОР-60 можно сделать следующие выводы.

1. Облучение направляющей гильзы стержня температурной компенсации в реакторе БН-350 до максимальной повреждающей дозы 65 сна приводит к ее значительному искривлению (максимальная стрела прогиба 15 мм) и изменению диаметра. В районе центра АЗ при исходном диаметре цилиндрической части гильзы, равном 84 мм, в одном из направлений ее размер увеличился до 89 мм. В перпендикулярном направлении размер гильзы уменьшился ниже исходного до 82 мм.

2. Эксплуатация направляющей гильзы стержня аварийной защиты (АЗ) реактора БОР-60 до максимальной дозы 120 сна приводит к значительному увеличению размера шестигранной трубы по ребрам и уменьшению размера шестигранника посередине грани.

3. Изменение размеров направляющих гильз стержней СУЗ происходит в результате неоднородного распухания материала гильз (аустенитных нержавеющей сталей ЭП-150 и Х18Н9) по высоте, периметру и толщине стенки. Градиент распухания приводит к появлению в материале гильз значительных внутренних напряжений, под действием которых в результате радиационной ползучести происходит дальнейшая деформация гильзы в сторону уменьшения ее исходного размера. Высокий уровень остаточных напряжений в сочетании с полным охрупчиванием материала гильзы может привести к ее разрушению даже в отсутствие внешних нагрузок.

### Литература

1. *Cawthorne C., Fulton E.J.* Voids in Irradiated Stainless Steel // *Nature*. – 1967. Vol. 216. No. 11. PP. 575-576.
2. *Norris D.I.R.* Voids in Irradiated Metals (Part I) // *Radiation Effects*. – 1972. Vol. 14. PP. 1-37.
3. *Norris D.I.R.* Voids in Irradiated Metals (Part II) // *Radiation Effects*. – 1972. Vol. 15. PP. 1-22.
4. *Быков В.Н., Вахтин А.Г., Дмитриев В.Д., Конобеев Ю.В., Костромин Л.Г., Реутов В.Ф.* Исследование распухания конструкционных сталей карбидной зоны реактора БР-5 // *Атомная энергия*. – 1973. – Т. 34. – Вып. 4. – С. 247-250.
5. *Лухачев Ю.И., Прошкин А.А., Щербакова Ж.Н.* / Труды Физико-энергетического института. – М.: Атомиздат, 1974.
6. *Foster J., Boltax A.*, Observation of swelling-irradiation creep interaction at low values of swelling with CW 316 SS // *J. Nucl. Mater.* – 1991. Vol. 183. PP. 115-123.
7. *Flinn J.E., McVay G.L., Walters L.C.* In-reactor deformation of solution annealed type 304L stainless steel // *J. Nucl. Mater.* – 1977. Vol. 65. PP. 210-223.
8. *Уолтер А., Рейнольдс А.* Реакторы-размножители на быстрых нейтронах – М.: Энергоатомиздат, 1986.
9. *Бескоровайный Н.М., Калинин Б.А., Платонов П.А., Чернов И.И.* Конструкционные материалы ядерных реакторов – М.: Энергоатомиздат, 1995.
10. ГОСТ 5632-72. С.17.
11. *Красноселов В.А., Косенков В.М., Лобода Е.М. и др.* Материаловедческое исследование гильзы компенсирующего стержня реактора БОР-60 после облучения флюенсом  $1.6 \cdot 10^{23}$  нейтр./см<sup>2</sup> ( $E > 0,1$  МэВ) // *Атомная энергия*. – 1978. – Т. 44. – Вып. 3. – С. 228-231.
12. *Голованов В.Н., Повстанко А.В., Неустроев В.С. и др.* Материаловедческие исследования гильзы СУЗ реактора БОР-60 // *Атомная энергия*. – 1985. – Т. 59. – Вып. 4. – С. 289-290.
13. *Щербак В.И., Костромин Л.Г., Дмитриев В.Д.* Влияние перепада температуры на распухание стали Х18Н9 по стенке гильзы СУЗ // *Атомная энергия*. – 1985. – Т. 47. – Вып. 5. – С. 336-337.

Поступила в редакцию 26.12.2014 г.

### Авторы

Поролло Сергей Иванович, ведущий научный сотрудник, канд. техн. наук

E-mail: porollo@ipre.ru

Конобеев Юрий Васильевич, главный научный сотрудник, доктор физ.-мат. наук

E-mail: konobeev@ipre.ru

Гарнер Френсис Альберт, директор фирмы «Консультации по влиянию облучения», доктор наук, Ричланд, штат Вашингтон, США

E-mail: frank.garner@dslextreme.com



## SWELLING OF GUIDE TUBES FOR SAFETY RODS IN NONUNIFORM FIELDS OF TEMPERATURE AND IRRADIATION

Porollo S.I., Konobeev Yu.V., Garner F.A.\*

State Scientific Center of Russian Federation – Institute for Physics and Power Engineering, 1, Bondarenko sq., Obninsk, Kaluga reg., 249033 Russia

\* Radiation Effects Consulting, Richland WA, USA

### ABSTRACT

The purpose of the present work is to investigate shape changes and void swelling in safety rod guide tubes of the reactors BN-350 and BOR 60 after operation for the scheduled life time. Post-irradiation measurements of diameters of the reactor BN-350 temperature compensator were carried out for two mutually perpendicular positions after 50-100 mm along the core height with accuracy of 0.1 mm. Sizes of the reactor BOR-60 safety tube were measured for various cross sections along the core height at edges and face middles. The swelling of the tube material was measured by an Archimedes technique.

As a result of examination it was established, that neutron irradiation of the guide tube of the temperature compensator rod in BN-350 reactor core to the maximum dose of 65 dpa has led to its significant curvature (the maximal bending deflection is equal to 15 mm) and to diameter changes. Near the core center the tube diameter has increased in one of the directions to 89 mm from the initial value of 84 mm. In the perpendicular direction the tube diameter has decreased up to 82 mm, i.e. below initial value.

The operation of the safety rod guide tube in the BOR-60 reactor core to the maximum dose of 120 dpa has led to a significant increase of the hexagonal tube size between opposite edges and to a reduction of the flat-to-flat size at the tube face middle.

The change of safety rod guide tube sizes occurs due to a non-uniform swelling of the material (austenitic stainless steels EP-150 and 18Cr-9Ni) along tube wall height, perimeter and thickness. The swelling gradient leads to occurrence of significant internal stresses, under action of which a further deformation of the guide tube occurs in the form of initial size reduction due to irradiation creep. The high level of residual stresses in a combination with a complete brittleness of the tube material can lead to the tube failure even in the absence of any external loadings.

**Key words:** fast reactor, swelling, irradiation creep, guide tubes, temperature gradient, damage dose.

### REFERENCES

1. Cawthorne C., Fulton E.J. Voids in Irradiated Stainless Steel. *Nature*, 1967, v. 216, no. 11, pp. 575-576.
2. Norris D.I.R. Voids in Irradiated Metals (Part I). *Radiation Effects*, 1972, v. 14, pp. 1-37.
3. Norris D.I.R. Voids in Irradiated Metals (Part II). *Radiation Effects*, 1972, v. 15, pp. 1-22.
4. Bykov V.N., Vahtin A.G., Dmitriev V.D., Konobeev Yu.V., Kostromin L.G., Reutov V.F. The investigation of void swelling in structural steels of the BR-10 reactor carbide core. *Atomnaya Energiya*. 1973, v. 34, iss. 4, pp. 247-250 (in Russian).
5. Lihachyov Yu.I., Proshkin A.A., Scherbakova Zh.N. *Trudy Fiziko-energeticheskogo instituta*, [Proceedings of the Institute for Physics and Power Engineering]. Moscow, Atomizdat Publ., 1974. 358 p. (in Russian).
6. Foster J., Boltax A. Observation of swelling-irradiation creep interaction at low values of

swelling with CW 316 SS. *J. Nucl. Mater.* 1991, v. 183, pp. 115-123.

7. Flinn J.E., McVay G.L., Walters L.C. In-reactor deformation of solution annealed type 304L stainless steel. *J. Nucl. Mater.* 1977, v. 65, pp. 210-223.

8. Waltar Alan E., Reynolds Albert B. Fast Breeder Reactors. Pergamon Press, 1981.

9. Beskorovajnyj N.M., Kalin B.A., Platonov P.A., Chernov I.I. *Konstruktsionnye materialy yadernyh reaktorov* [Structural materials for nuclear reactors]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1995. 704 p. (in Russian).

10. GOST 5632-72. P.17 (in Russian).

11. Krasnosyolov V.A., Kosenkov V.M., Loboda E.M. Materials science investigation of a compensating rod guide tube irradiated to the neutron fluence of  $1.6 \cdot 10^{23} \text{ n/cm}^2$  ( $E > 0.1 \text{ MeV}$ ) in the BOR-60 reactor. *Atomnaya Energiya*, 1978, v. 44, iss. 3, pp. 228-231 (in Russian).

12. Golovanov V.N., Povstyanko A.V., Neustroev V.S. Materials science investigation of the BOR-60 reactor safety guide tube. *Atomnaya Energiya*, 1985, v. 59, iss. 4, pp. 289-290 (in Russian).

13. Scherbak V.I., Kostromin L.G., Dmitriev V.D. The influence of temperature drop across the safety guide tube wall on the void swelling of 18 Cr-9 Ni steel. *Atomnaya Energiya*, 1985, v. 47, iss. 5, pp. 336-337 (in Russian).

#### Authors

Porollo Sergej Ivanovich, Leading Scientist, Cand. Sci. (Engineering),

E-mail: porollo@ippe.ru

Konobeev Yuriy Vasil'evich, Chief Researcher, Dr. Sci. (Phys.-Math.)

E-mail: konobeev@ippe.ru

Garner Francis Albert, Head of Radiation Effects Consulting, PhD,

E-mail: frank.garner@dslextrema.com