

О ФОРМОИЗМЕНЕНИИ ТЕПЛОВЫДЕЛЯЮЩИХ СБОРОК РЕАКТОРА БН-350

Л.М. Забудько

АО «Прорыв»

107140, г. Москва, ул. Малая Красносельская, д. 2/8, к. 7

Для цитирования: *Забудько Л.М.* О формоизменении тепловыделяющих сборок реактора БН-350. // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2023. – № 3. – С. 159-163. DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2023.3.15>.

ВВЕДЕНИЕ

Вследствие распухания и радиационной ползучести сталей происходит формоизменение ТВС (увеличение длины и поперечных размеров), что может привести к перекрытию зазоров между ними и, как следствие, к ограничению выгорания топлива. Неравномерное распухание материалов ТВС, обусловленное градиентами температур и нейтронных полей, вызывает изгиб и дополнительные напряжения. Дополнительные напряжения между шестигранным чехлом и пучком твэлов в ТВС могут возникать также вследствие их разных скоростей деформирования.

Расчетное определение напряженно-деформированного состояния и обоснование работоспособности чехлов ТВС в значительной мере определяются знанием свойств конструкционных материалов в условиях высоких повреждающих доз.

КОНСТРУКЦИЯ И ПАРАМЕТРЫ ОБЛУЧЕНИЯ ТВС БЫСТРОГО НАТРИЕВОГО РЕАКТОРА

Типичная конструкция ТВС быстрого реактора состоит из следующих составных частей: верхней (головки, обеспечивающей направленный выход теплоносителя из ТВС, и за которую происходит захват сборки при загрузке-выгрузке); нижней (хвостовика, который обеспечивает установку ТВС в коллектор и дросселирование расхода теплоносителя через нее); средней, состоящей из шестигранного чехла, внутри которого размещен пучок тепловыделяющих элементов. Жесткие условия эксплуатации ТВС (максимальная повреждающая доза ≥ 100 сна; максимальная температура теплоносителя до 650°C) определяют требования к материалам и конструкции ТВС, которые должны обеспечить их работоспособность, т.е. отсутствие существенного формоизменения и нарушения целостности конструктивных элементов ТВС (твэлов и шестигранного чехла).

Типичное распределение давления теплоносителя, плотности нейтронного потока и температуры теплоносителя по высоте ТВС представлены на рис. 1 [1]. В БН-350 максимальная температура теплоносителя на выходе из активной зоны не превышала 420°C .

В 1967 г. английскими исследователями Коутоном и Фултоном было открыто радиационное распухание конструкционных материалов оболочек твэлов и чехлов ТВС, наиболее неприятное последствие облучения высокими повреждающими дозами. Распухание приводит к изотропному увеличению объема материала. Тогда же была

© *Л.М. Забудько, 2023*

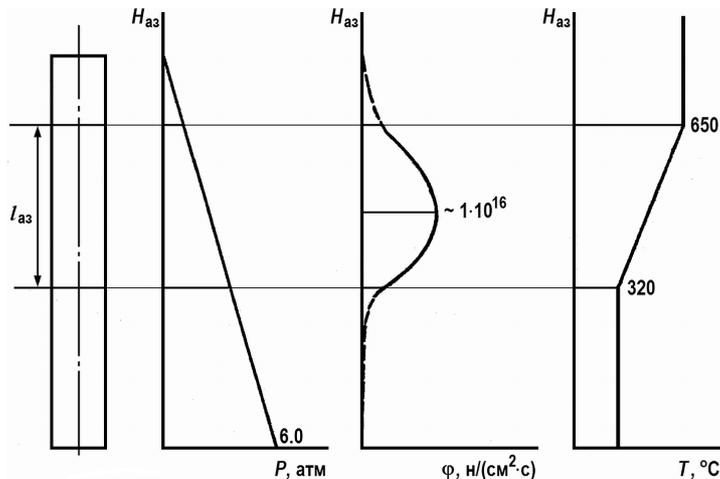


Рис. 1. Схематичное изображение внутреннего давления теплоносителя на чехол ТВС (P), плотности нейтронного потока (ϕ), температуры теплоносителя (T) по высоте ТВС быстрого реактора с натриевым теплоносителем [1]

обнаружена и радиационная ползучесть – второй по важности после распухания источник размерной нестабильности элементов ТВС реакторов БН.

Вследствие отсутствия необходимой информации на первых этапах чехлы ТВС реактора БН-350 были изготовлены из аустенитных сталей 18Cr-10Ni-Ti, как оказалось, сильно распухающей, затем из 16Cr-11Ni-3Mo в аустенизированном состоянии, затем из 16Cr-11Ni-3Mo в холодно-деформированном состоянии. Данные по поведению под облучением всех этих чехловых сталей впервые были получены сотрудниками ГНЦ «РФ – ФЭИ» совместно с сотрудниками реактора БН-350 [2].

АНАЛИЗ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ ОБ ИЗМЕНЕНИИ ФОРМЫ И РАЗМЕРОВ ШЕСТИГРАННОГО ЧЕХЛА ТВС

В ГНЦ «РФ – ФЭИ» была разработана методология определения величин распухания и радиационной ползучести чехловой стали, основанная на особенностях деформирования чехла: выгиб грани шестигранного чехла происходит под действием внутреннего давления теплоносителя от радиационной ползучести, а равномерное геометрически подобное увеличение размера «под ключ» – в результате распухания чехловой стали. Эта особенность позволяет разделить составляющие деформации от распухания и радиационной ползучести. Последующая статистическая обработка экспериментальных данных позволяет установить зависимости от повреждающей дозы, температуры, напряжений, вызванных давлением теплоносителя [2].

Первая информация о наличии распухания чехловой стали была получена сотрудниками БН-350 при перегрузке, поскольку допустимое удлинение ТВС ограничивается конструкцией перегрузочной машины. Исследования деформации чехлов (из стали 18Cr-10Ni-Ti) в горячей камере БН-350 начались с конца 1974 г., когда впервые обнаружили овализацию поперечного сечения чехла от радиационной ползучести (рис. 2). Дальнейшие исследования проводились совместно с сотрудниками Физико-энергетического института [2, 4].

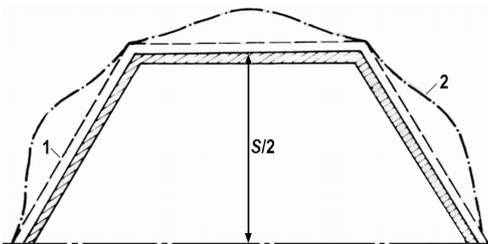


Рис. 2. Формоизменение шестигранного чехла ТВС, обусловленное распуханием (1) и радиационной ползучестью (2) чехловой стали [3]

В.Н. Караулов, сотрудник БН-350, разработал установку для проведения измерений геометрии чехлов отработавших ТВС в бассейне выдержки. Позднее документация на установку была передана на реактор БН-600. На рисунке 3 представлена схема установки [5]. Устройство перемещается с постоянной скоростью по высоте сборки с непрерывной регистрацией отклонений поперечных размеров «под ключ» и по диагонали чехла. Проводя замеры по диагонали чехла и размера «под ключ» до и после облучения, получаем составляющие его формоизменения, обусловленные отдельно распуханием и радиационной ползучестью, в разных сечениях по высоте.

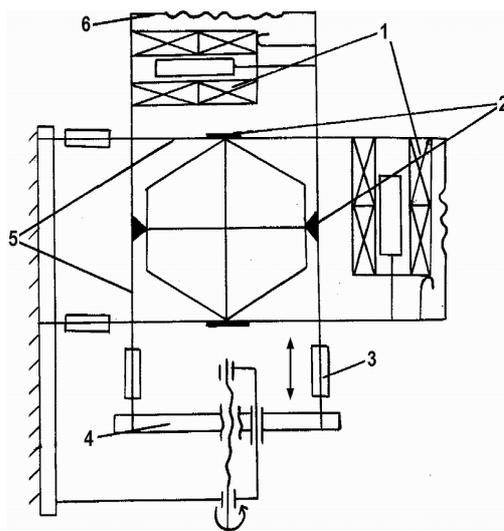


Рис. 3. Схема установки для измерения размеров шестигранного чехла ТВС в бассейне выдержки: 1 – дифференциально-трансформаторные датчики; 2 – щупы; 3 – плоская пружина; 4 – механизм перемещения; 5 – рычаги; 6 – пружина сжатия

Статистическая обработка полученных данных дает возможность установить зависимость изменения размера «под ключ» чехла, обусловленного радиационной ползучестью, от повреждающей дозы, внутреннего давления теплоносителя и температуры. Соотношения для распухания получаются путем непосредственной статистической обработки экспериментальных данных геометрически подобного изменения размера «под ключ». Этот подход был впервые использован при обработке данных об изменении формы чехлов БН-350, облученных до доз 20, 25 и 50 сна.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанные в конце 1970-х гг. сотрудниками обнинского Физико-энергетического института и БН-350 подходы к получению экспериментальных данных по распуханию и радиационной ползучести шестигранных чехлов ТВС быстрых натриевых реакторов позволили получать экспресс-информацию об их формоизменении под облучением при высоких повреждающих дозах в быстром реакторе с натриевым теплоносителем.

Последующий анализ экспериментальных данных по формоизменению чехлов БН-350 и БН-600 полностью подтвердил правомочность данного подхода для получения оценок и зависимостей распухания и радиационной ползучести чехловых материалов. Полученные на БН-350 результаты для чехловой стали 16Cr-11Ni-3Mo в аустенизированном состоянии, которая была использована в стартовой активной зоне реактора БН-600, позволили еще до старта БН-600 откорректировать проектный ре-

курс ТВС, снизив уровень выгорания топлива и повреждающей дозы, во избежание их заклинивания.

Позднее материал чехла был заменен на более радиационно стойкую сталь 16Cr-11Ni-3Mo в холодно деформированном состоянии. В настоящее время чехлы ТВС реакторов БН-600 и БН-800 изготовлены из малораспухающей стали ферритно-мартенситного класса ЭП450-Ш и не лимитируют ресурс ТВС [6].

Литература

1. Прошкин А.А., Забудько Л.М. Некоторые вопросы работоспособности шестигранных чехлов быстрых реакторов. Препринт ФЭИ-701. – Обнинск: ФЭИ, 1976. – 39 с.
2. Прошкин А.А., Лихачев Ю.И., Тузов А.Н., Забудько Л.М., Бондаренко В.В., Караулов В.Н. Анализ экспериментальных данных об изменении формы ТВС быстрых реакторов. // Атомная энергия. – 1981. – Т. 50. – Вып. 1. – С. 13 – 17.
3. Забудько Л.М., Лихачев Ю.И., Прошкин А.А. Работоспособность ТВС быстрых реакторов. – М.: Энергоатомиздат, 1988 – 168 с. ISBN 5-283-03749-5.
4. Karaulov V.N., Blynski A.P., Yakovlev I.L., Lambert J.D.B. Assembly and fuel pin irradiation behavior in the BN-350 fast reactor. / Труды ICONE8 (VIIIth International Conference on Nuclear Engineering), April 2-6, 2000, Baltimore, MD USA, No. 8394.
5. Козманов Е.А., Огородов А.Н., Чуев В.В. Методическое обеспечение первичных послереакторных исследований элементов активной зоны реактора БН-600. / Сборник научных трудов «Исследования конструкционных материалов элементов активной зоны быстрых натриевых реакторов». – Екатеринбург: УрО РАН, 1994. – С. 3-48. ISBN 5-7691-0473-2,
6. Поплавский В.М., Забудько Л.М., Шкабура И.А., Скупов М.В., Бычков А.В., Кислый В.А., Крюков Ф.Н., Васильев Б.А. Топливо для перспективных быстрых натриевых реакторов – текущее состояние и планы. // Атомная энергия. – 2010. – Т. 108. – Вып. 4. – С. 212-216.

Поступила в редакцию 04.08.2023 г.

Автор

Забудько Людмила Михайловна, научный руководитель, канд. техн. наук
E-mail: zlm@proryv2020.ru

UDC 621.039.534:541.15

On Dilation of the BN-350 Reactor Fuel Assemblies

Zabudko L.M.

Proryv JSC

2/8 bld 7 Malaya Krasnoselskaya Str., 107140 Moscow, Russia

ABSTRACT

The irradiation conditions in a fast sodium reactor lead to a major dilation of the fuel assembly components: the hexagonal wrapper and the fuel cladding. The paper describes the development of the methodology for investigating the wrapper steel swelling and irradiation creep based on the specific features of the wrapper deformation. As a result of the statistical processing of experimental data from measuring the geometry of the BN-350 reactor spent fuel assembly wrappers in the cooling pond, dependences of the wrapper steel swelling and irradiation creep on the dose, temperature, and stresses caused by the coolant pressure were obtained for the first time. The results obtained in the BN-350 reactor for the 16Cr-11Ni-3Mo (annealed) wrapper steel, which was used in the starting core of the BN-600 reactor, have made it possible to adjust the fuel life before the BN-600 startup.

Currently, the BN-600 and BN-800 reactor fuel assembly wrappers are made of the EP450-Sh ferrite-martensitic steel and do not limit the fuel lifetime.

Key words: fast reactor, BN-350, fuel assembly, hexagonal wrapper, dilation, steel swelling, irradiation creep, cooling pool.

For citation: Zabudko L.M. On dilation of the BN-350 reactor fuel assemblies. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*. 2023, no. 3, pp. 159-163; DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2023.3.15> (in Russian).

REFERENCES

1. Proshkin A.A., Zabudko L.M. Some Issues of Performance of Hexagonal Wrappers of Fast Reactors. Preprint IPPE-701. Obninsk. FEI Publ., 1976, 39 p. (in Russian).
2. Proshkin A.A., Likhachev Yu.I., Tuzov A.A., Zabudko L.M., Bondarenko V.V., Karaulov V.N. Analysis of Experimental Data on Distortion Behavior of Fast Reactors Subassemblies. *Atomnaya Energiya*. 1981, v. 50, iss. 1, pp. 13-17 (in Russian).
3. Zabudko L.M., Likhachev Yu.I., Proshkin A.A. Performance of Fast Reactors Subassemblies. Moscow. Energoatomizdat Publ., 1988, 168 p. (in Russian).
4. Karaulov V.N., Blynski A.P., Yakovlev I.L., Lambert J.D.B. Assembly and Fuel Pin Irradiation Behavior in the BN-350 Fast Reactor. Proc. of the ICONE8 (VIII-th International Conference on Nuclear Engineering), April 2-6, 2000, Baltimore, MD USA, No. 8394.
5. Kozmanov E.A., Ogorodov A.N., Chuev V.V. Methodological support of Non-Destructive Post-Irradiation Examinations of the BN-600 Reactor Core Elements. Proc. of Scientific Papers «Study of Core Elements Structural Materials of Sodium Fast Reactors». Ekaterinburg. UrO RAN Publ., 1994, pp. 3-48. ISBN 5-7691-0473-2 (in Russian).
6. Poplavskiy V.M., Zabudko L.M., Schkabura I.A., Skupov M.V., Bytchkov A.V., Kisliy V.A., Krukov F.N., Vasiliev B.A. Fuel for Advanced Sodium Fast Reactors – Current Status and Plans. *Atomnaya Energiya*. 2010, v. 108, iss. 4, pp. 212-216 (in Russian).

Author

Lyudmila M. Zabudko, Scientific Supervisor, Cand. Sci. (Engineering)
E-mail: zlm@proryv2020.ru