

ИЗМЕНЕНИЕ ИЗГИБНОЙ ЖЕСТКОСТИ ТВС ВВЭР-1000 ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ

С.В. Павлов

ООО НПФ «Сосны»

433507, Ульяновская обл., г. Димитровград, пр. Димитрова, д. 4а



Геометрическая стабильность конструкции ТВС ВВЭР-1000 при эксплуатации во многом определяется величиной ее изгибной жесткости. Уменьшение изгибной жесткости во время эксплуатации в реакторе может приводить к такому прогибу ТВС, который будет затруднять перемещение поглощающих стержней системы управления и защиты реактора в направляющих каналах ТВС, что не допустимо с точки зрения безопасной эксплуатации реактора.

Описаны метод и установка для исследования изгибной жесткости облученных ТВС ВВЭР-1000 в защитных камерах. Метод основан на измерениях величины прогиба ТВС при поперечных нагрузках. Нагрузка прикладывается к дистанционирующим решеткам перпендикулярно их граням, величина прогиба ТВС определяется оптическими методами с помощью телекамеры. Эта же установка позволяет исследовать изгибную жесткость каркаса ТВС после извлечения из нее всех твэлов. В Научно-исследовательском институте атомных реакторов г. Димитровграда исследовано несколько десятков ТВС ВВЭР-1000 с выгоранием ядерного топлива в диапазоне от ~ 4 до ~ 65 МВт-сут/кгU. Обобщение и анализ результатов этих исследований позволили определить основные факторы, влияющие на изменение изгибной жесткости ТВС ВВЭР-1000 при эксплуатации, и получить экспериментальную зависимость ее изменения от выгорания.

Показано, что с увеличением выгорания изгибная жесткость ТВСА и ТВС-2 с «жестким» каркасом уменьшается до минимальных значений ~ 5 кгс/мм при выгорании от 45 до 50 МВт-сут/кгU, а затем начинает расти. Установлено, что характер изменения изгибной жесткости ТВС определяется, в основном, пучком твэлов, в частности, изменением степени поджатия твэлов в ячейках дистанционирующих решеток ТВС. Максимальная величина прогиба ТВСА и ТВС-2 находится в диапазоне от 8 до 11 мм при выгорании от 48 до 63 МВт-сут/кгU. Внедрение новых конструкций ТВСА и ТВС-2 полностью решило проблему безопасной эксплуатации поглощающих стержней системы управления и защиты реактора ВВЭР-1000.

Ключевые слова: ТВС, твэл, ВВЭР, изгибная жесткость, выгорание ядерного топлива, дистанционирующая решетка, каркас ТВС, прогиб ТВС.

Безопасная работа энергоблоков АЭС с реакторами ВВЭР-1000 во многом определяется геометрической стабильностью конструкции ТВС (величина и форма прогиба, угол скручивания, длина, поперечный размер, депланация дистанционирующих решеток) в течение всего срока их эксплуатации. От изменения геометрических параметров ТВС зависят надежность работы органов системы управления и защиты реактора (ОР СУЗ), а

© С.В. Павлов, 2016

также безопасность транспортно-технологических операций с ТВС при перегрузке ядерного топлива во время планового предупредительного ремонта энергоблока.

Для улучшения нейтронно-физических характеристик активных зон реакторов ВВЭР-1000 серийная ТВС со стальным каркасом была заменена на усовершенствованную ТВС (УТВС), в которой направляющие каналы (НК) и дистанционирующие решетки (ДР) со стальных заменены на циркониевые. Дистанционирующие решетки крепятся к центральной трубе ТВС, а НК крепятся внизу в опорной решетке хвостовика ТВС, вверху – в головке ТВС и свободно проходят через ДР [1, 2].

Результаты исследований шести УТВС в НИИАР показали, что уже после одного топливного цикла (выгорание 10 – 16 МВт·сут/кгU) прогиб УТВС достигает ~ 15 мм и имеет зигзагообразную форму. Причинами искривления УТВС могут быть осевые нагрузки со стороны блока защитных труб (БЗТ) реактора, поперечные нагрузки со стороны соседних ТВС, а также снижение изгибной жесткости УТВС при эксплуатации [3, 4]. При выгорании ~ 40 МВт·сут/кгU прогиб достигает 18 мм. Эти два фактора, величина прогиба и его форма, как было установлено, являются основными причинами увеличения времени падения поглощающих стержней ОР СУЗ в НК ТВС, и даже возможном их застревании при срабатывании аварийной защиты реактора, что недопустимо с точки зрения безопасности эксплуатации реактора [5, 6].

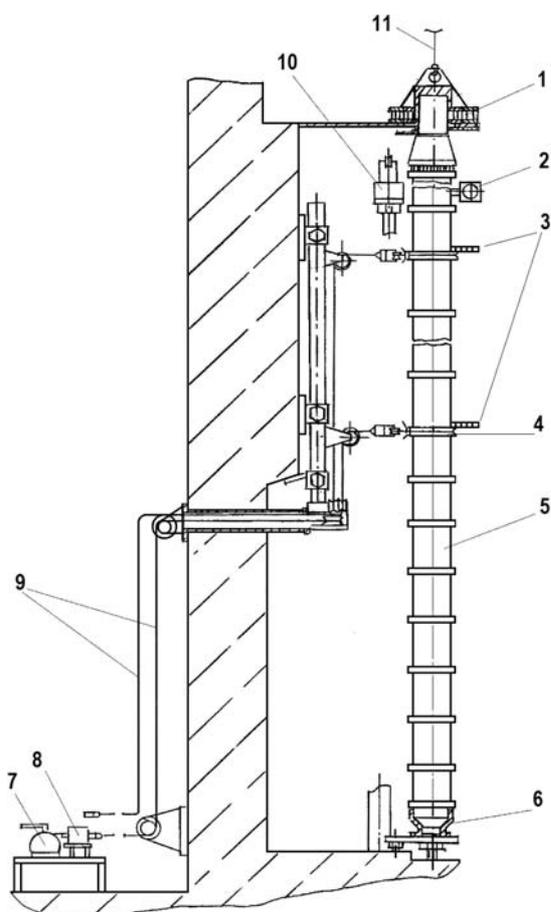


Рис. 1. Схема установки измерения изгибной жесткости ТВС: 1 – узел крепления головки ТВС; 2 – телекамера; 3 – измерительная линейка; 4 – силовонагружающее кольцо; 5 – ТВС; 6 – узел крепления хвостовика ТВС; 7 – лебедка; 8 – динамометр; 9 – тросы; 10 – стойка телекамеры; 11 – трос подъемного крана

Для исследования изгибной жесткости облученных ТВС в НИИАР был разработан метод и внутрикамерная установка (рис. 1), в основу которых положен принцип определения изгибной жесткости ТВС по величине прогиба при поперечных нагрузках ТВС [6 – 8].

Установка состоит из трех основных частей – силовонагружающей системы, узлов крепления ТВС и системы измерения прогиба ТВС с помощью телекамеры, перемещающейся вдоль ТВС. Крепление ТВС в установке имитирует реакторные условия крепления. Прогиб ТВС осуществляется путем приложения нагрузки перпендикулярно граням на уровне восьмой (ДР8) или двенадцатой (ДР12) дистанционирующих решеток. Нагрузка передается через силовонагружающее кольцо, которое плотно надевается на ДР. К кольцу подсоединяется трос, который с помощью роликов выводится через горизонтальную проходку защитной камеры в операторское помещение, где через динамометр соединяется с силовонагружающей лебедкой.

Нагрузка к ДР прикладывается ступенями по 10 – 15 кгс с разгрузкой после каждой ступени. При этом с помощью телекамеры измеряется смещение каждой ДР в ТВС. Результаты обрабатываются, сглаживаются и восстанавливается форма оси ТВС под нагрузкой и после снятия нагрузки.

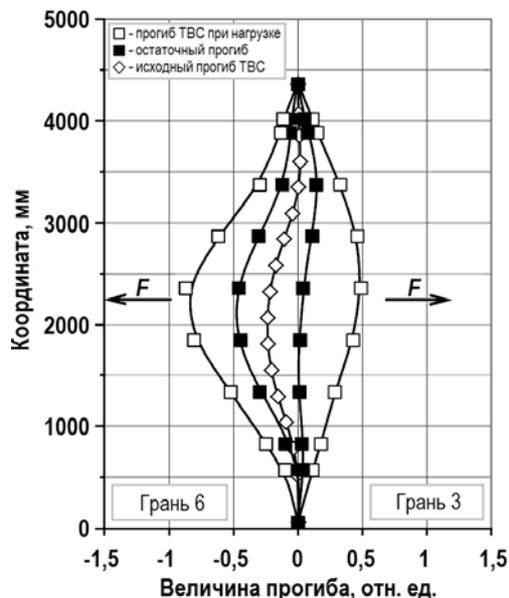


Рис. 2. Форма оси ТВС при испытаниях

На рисунке 2 в качестве примера приведена форма оси ТВС при нагрузке на 8 ДР в двух противоположных направлениях: в направлении от третьей грани ТВС в сторону шестой грани и наоборот. На рисунке также показана форма исходного прогиба после эксплуатации ТВС и остаточных прогибов после снятия нагрузки. Остаточный прогиб объясняется взаимодействием оболочек твэлов и НК с дистанционирующими решетками при прогибе ТВС под нагрузкой. Достаточно сборку подвесить на кране и немного дернуть вверх, чтобы остаточный прогиб исчез.

Изгибную жесткость ТВС характеризуют коэффициентом $k_{\text{ТВС}}$, который определяют с погрешностью не более 4% из зависимости величины прогиба B от приложенной нагрузки F (рис. 3) [7]:

$$k_{\text{ТВС}} = dF/dB. \quad (1)$$

Обычно коэффициент $k_{\text{ТВС}}$ определяют для середины ТВС на уровне 8 ДР для конструкций ТВС с пятнадцатью решетками.

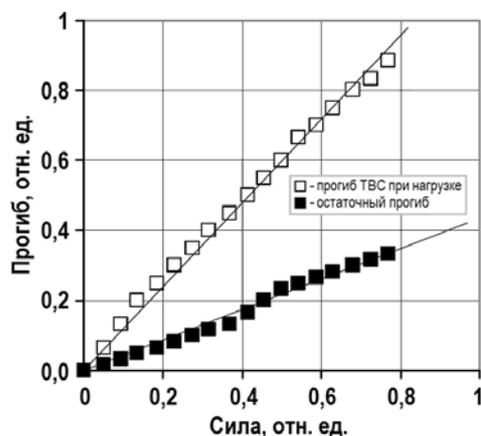


Рис. 3. Прогиб ТВС на уровне 8ДР в зависимости от приложенной силы

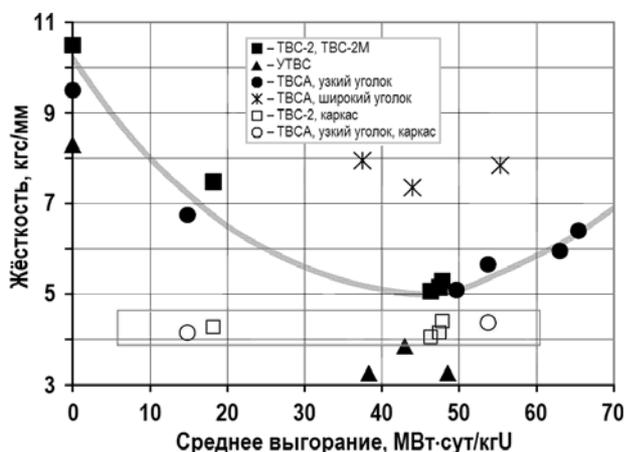


Рис. 4. Изменение изгибной жесткости ТВС ВВЭР-1000 от выгорания

Результаты исследований УТВС (рис. 4) показали, что при выгорании примерно от 38 до 48 МВт-сут/кгU их изгибная жесткость уменьшается более чем в два раза – с 8,3 до 3 – 4 кгс/мм, что и приводит к значительному прогибу УТВС [9, 10].

Для увеличения изгибной жесткости разработаны две конструкции – ТВСА и ТВС-2 с жестким каркасом. В ТВСА жесткость каркаса обеспечивается шестью уголками из сплава Э635, которые контактно-точечной сваркой соединены с ДР. Внизу уголки крепятся к хвостовику ТВСА. Центральная труба и НК свободно проходят через ДР и не крепятся к ним [11]. В первых конструкциях уголок закрывал три твэла (вместе с угловым) на грани ТВСА [12]. Изгибная жесткость была увеличена в сравнении с УТВС в два раза при выгораниях от 37 до 55 МВт-сут/кгU (см. рис. 4). В дальнейшем ширина уголков в ТВСА была уменьшена, что, естественно, привело к уменьшению изгибной жесткости конструкции сборки.

В ТВС-2 повышение жесткости каркаса сборки достигается другим образом: направляющие каналы с помощью контактно-стыковой сварки крепятся ко всем 18 ДР, высота ДР увеличена с 20 до 30 мм, а толщина ячеек ДР увеличена до 0,3 мм [13]. При этом изгибная жесткость ТВС-2 ненамного отличается от изгибной жесткости ТВСА с «узким» уголком (см. рис. 4).

С помощью разработанного метода и установки исследован вклад твэлов в изгибную жесткость ТВС ВВЭР-1000. После исследования ТВС (осмотр, измерение гео-

метрических параметров и определение изгибной жесткости) выполнялся демонтаж головки ТВС и извлечение всех твэлов из каркаса. При этом измерялось усилие извлечения твэлов через все дистанционирующие решетки ТВС. Затем на каркас устанавливалась обратно головка ТВС и исследовалась изгибная жесткость каркаса без твэлов.

Исследования показали, что после одного топливного цикла эксплуатации ТВСА и ТВС-2, начиная с выгорания топлива 15 – 18 МВт·сут/кгU и вплоть до выгорания ~ 54 МВт·сут/кгU, жесткость каркаса этих конструкций ТВС не изменяется и находится в диапазоне 4 – 4,5 кгс/мм (см. рис. 4). В то же самое время изгибная жесткость ТВСА и ТВС-2 с выгоранием уменьшается от примерно 10 кгс/мм для необлученных ТВС до минимальных значений около 5 кгс/мм при выгораниях 45 – 50 МВт·сут/кгU, а затем начинает увеличиваться (см. рис. 4).

Такое поведение изгибной жесткости объясняется влиянием твэлов. При эксплуатации диаметр твэлов под воздействием избыточного давления теплоносителя уменьшается вплоть до плотного контакта оболочки с топливными таблетками. Для твэлов ВВЭР-1000 такой контакт наступает при максимальном значении выгорания в твэле от 50 до 60 МВт·сут/кгU (рис. 5) [14 – 17]. При этом диаметр оболочки твэлов уменьшается примерно на 0,08 мм. Затем под воздействием распухающего топлива происходит «обратная» деформация оболочки и диаметр начинает увеличиваться.

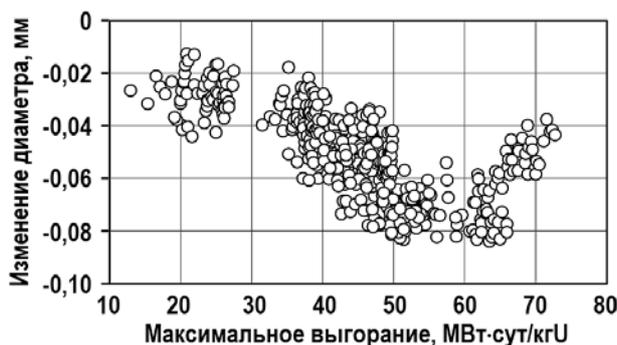


Рис. 5. Изменение диаметра оболочек твэлов ВВЭР-1000 в зависимости от выгорания топлива

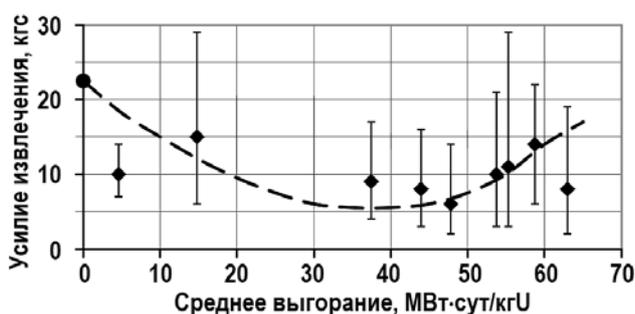


Рис. 6. Усилие извлечения твэлов из каркаса ТВС ВВЭР-1000

Уменьшение диаметра оболочки твэлов приводит к уменьшению усилия их поджатия в ячейках дистанционирующих решеток и, как следствие, к уменьшению изгибной жесткости конструкции ТВС. Уменьшение усилия поджатия твэлов в ячейках дистанционирующих решеток косвенно подтверждается изменением усилия извлечения твэлов из каркаса ТВС от выгорания. На рисунке 6 приведены результаты усреднения по всем 312-ти твэлам в ТВС и диапазоны изменения усилий извлечения твэлов из каркасов ТВСА и ТВС-2 в зависимости от выгорания. Минимум усилия

извлечения приходится на среднее выгорание по ТВС ~ 44 МВт·сут/кгU [10]. Если учитывать «физическую» разницу в значениях среднего выгорания по ТВС и максимального значения выгорания в твэле, то минимумы на рис. 5 и 6 приходятся приблизительно на одинаковый диапазон выгораний в пересчете на среднее выгорание в ТВС.

В числовом выражении вклад твэлов в изгибную жесткость ТВС в зависимости от выгорания можно получить из данных рис. 4, используя простую формулу

$$k_{ТВ} / k_{ТВС} = (k_{ТВС} - k_{кар}) / k_{ТВС}, \quad (2)$$

где $k_{ТВ}$ - изгибная жесткость, вносимая пучком твэлов; $k_{кар}$ - изгибная жесткость каркаса ТВС.

Так как не для всех ТВС, представленных на рис. 4, исследовалась изгибная жесткость каркаса, было принято допущение, что изгибная жесткость каркаса ТВСА и ТВС-2 в диапазоне выгораний от 0 до 70 МВт·сут/кгU практически не изменяется. В соответствии с этим для ТВС, у которых не измерялась изгибная жесткость каркаса, ее величина принималась равной среднему значению $k_{кар}^{ср} = 4,23$ кгс/мм, полученному из экспериментальных данных для пяти ТВС (см. рис. 4) с выгоранием от ~ 15 до ~ 54 МВт·сут/кгU.

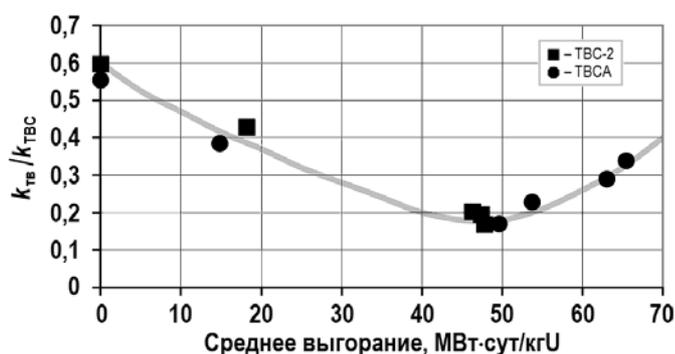


Рис. 7. Вклад пучка твэлов в изгибную жесткость ТВС в зависимости от выгорания

Для необлученных ТВСА и ТВС-2 60% изгибной жесткости сборок приходится на изгибную жесткость пучка твэлов (рис. 7). После первого года эксплуатации вклад твэлов в изгибную жесткость ТВС уменьшается на 20% и достигает своего минимума в 20% при дальнейшей эксплуатации до выгорания ~ 48 МВт·сут/кгU. Затем начинается рост вклада твэлов в изгибную жесткость, вызванный увеличением их диаметра из-за распухания топливных таблеток. При выгорании ~ 65 МВт·сут/кгU вклад твэлов в изгибную жесткость ТВС увеличивается примерно до 34%.

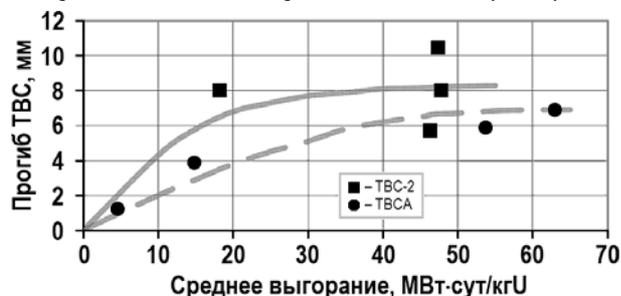


Рис. 8. Изменение величины прогиба ТВС от выгорания

Максимальная зарегистрированная величина прогиба у ТВСА не превышает 8 мм вплоть до выгораний 63 МВт·сут/кгU, у ТВС-2 при выгорании 48 МВт·сут/кгU про-

гиб не превышает 11 мм (рис. 8). При этом форма прогиба изменилась с зигзагообразной на дугообразную.

Увеличение изгибной жесткости конструкций ТВСА и ТВС-2 позволило кардинально решить проблему безопасности, связанную с эксплуатацией поглощающих стержней органов системы управления и защиты реактора (ПС СУЗ), что подтверждается, прежде всего, положительным опытом их эксплуатации [18 – 20].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработка новых конструкций ТВС ВВЭР-1000 с жестким каркасом (ТВСА и ТВС-2) позволила существенно увеличить изгибную жесткость ТВС и уменьшить величину их прогиба до максимальных значений 8 – 11 мм, что обеспечивает безопасную работу ПС СУЗ. Показано, что изменение изгибной жесткости ТВС при эксплуатации, в основном, определяется вкладом пучка твэлов и изменением степени их поджата в ячейках дистанционирующих решеток. Внедрение новых технических решений, таких как: уменьшение количества дистанционирующих решеток с 15 до 12 и затем до 8; изменение конструкции твэла – уменьшение толщины оболочки, уменьшение диаметрального зазора между оболочкой и топливными таблетками, увеличение длины твэла, могут привести к изменению изгибной жесткости ТВС ВВЭР-1000 и требуют экспериментального обоснования.

Литература

1. *Enin A., Bezborodov Y., Pluzhnikov D.* Improvement of VVER-1000 FA Design and Manufacturing Techniques: The Basic Results of Operation VVER-1000 FA Made by JSC NCCP. – Proceedings of the 8-th International Conference on VVER Fuel Performance, Modelling and Experimental Support, 26 September – 4 October 2009, Helena Resort, Bulgaria. PP. 201-209.
2. *Шмелёв В.Д.* Активные зоны ВВЭР для атомных станций. – М.: ИКЦ «Академкнига», – 2004. – 220 с.
3. *Троянов В.М., Лихачёв Ю.И., Фоломеев В.И.* Метод расчета продольно-поперечного изгиба бесчехловой ТВС ВВЭР-1000 при эксплуатационных нагрузках // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2002. – № 2. – С. 44-54.
4. *Троянов В.М., Лихачёв Ю.И., Фоломеев В.И.* Моделирование термомеханического поведения ТВС в составе активной зоны ВВЭР-1000 // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2002. – № 3. – С. 14-19.
5. Материалы работ межведомственной комиссии по выяснению причин застревания ОР СУЗ на энергоблоках с ВВЭР-1000. Т. 1-8. – М.: Концерн «Росэнергоатом», 1996.
6. *Поленок В.С., Павлов С.В., Смирнов В.П. и др.* Исследования по проблеме, связанной с изгибом ТВС ВВЭР-1000 при эксплуатации // Сб. докл. V Межотраслевой конференции по реакторному материаловедению. Димитровград, 8–12 сентября 1997. – Димитровград: ГНЦ РФ НИИАР, 1998. – Т. 1. – Ч.1. – С. 47-58.
7. *Павлов С.В., Поленок В.С., Смирнов В.П.* Методика определения прогибов ТВС ВВЭР-1000 при поперечных нагружениях / Сб. трудов НИИАР. – 1998. – Вып. 3. – С. 85-93.
8. *Павлов С.В., Сухих А.В., Сагалов С.С.* Неразрушающая диагностика состояния элементов активных зон ядерных реакторов. – Димитровград: ДИТИ НИЯУ МИФИ, 2015. – 320 с.
9. *Марков Д.В., Павлов С.В., Новоселов А.Е.* Топливо ВВЭР и РБМК нового поколения: результаты послереакторных исследований, обоснование надежности и работоспособности / Сб. докл. IX Российской конференции по реакторному материаловедению. Димитровград, 14–18 сентября 2009. – Димитровград: ОАО «ГНЦ НИИАР». – 2009. – С. 24–46.
10. *Pavlov S. V.* Key Results of VVER-1000 Fuel Assemblies Post-Irradiation Examinations. – 10-th International Conference on VVER Fuel Performance, Modeling and Experimental Support. 7-14 September 2013, Sandanski, Bulgaria. – PP. 213-227.
11. *Самойлов О.Б., Кайдалов В.Б., Романов А.И. и др.* Технические характеристики топливной сборки ТВСА ВВЭР-1000 / Сб. докл. VIII Российской конференции по реакторному

материаловедению. Димитровград: ОАО «ГНЦ НИИАР». – 2008. С. 4-12.

12. *Molchanov V., Starikov A., Samoilo O. et al.* Results of TVSA Fuel Assembly Development and 10-Year Operation in VVER-1000 Reactor Cores: Development Trends. – Proceedings of the VIII-th International Conference on VVER Fuel Performance, Modelling and Experimental Support, 26 September–4 October 2009, Helena Resort, Bulgaria. – PP. 191-200.

13. *Рыжов С.Б., Мохов В.А., Васильченко И.Н. и др.* Опыт разработки и результаты эксплуатации ТВС-2 и ТВС-2М / Сб. докл. IX Российской конференции по реакторному материаловедению, Димитровград, 14–18 сентября 2009 – Димитровград: ОАО «ГНЦ НИИАР». – 2009. – С. 46-52.

14. *Новосёлов А.Е., Павлов С.В., Поленок В.С. и др.* Состояние оболочек твэлов ВВЭР после шести лет эксплуатации // Физика и химия обработки материалов. – 2009. – № 2. – С. 24-32.

15. *Поленок В.С., Марков Д.В., Жителев В.А. и др.* Состояние и параметры твэлов ВВЭР с выгоранием топлива до 75 МВтЧсут/кгU / Сб. докл. VIII Российской конференции по реакторному материаловедению. Димитровград: ОАО «ГНЦ НИИАР». – 2008. – С. 138-147.

16. *Жителев В.А., Марков Д.В., Звир Е.А. и др.* Изменение геометрических параметров ТВС ВВЭР-1000 с жестким каркасом при эксплуатации / Сб. докл. IX Российской конференции по реакторному материаловедению, Димитровград, 14–18 сентября 2009 – Димитровград: ОАО «ГНЦ НИИАР». – 2009. – С. 121-129.

17. *Markov D.V., Pavlov S.V., Novoselov A. Ye. et al.* New Generation VVER and RBMK Fuel: Results of Post-irradiation Examinations, Justification of Operational Reliability. – Proceedings of 2010 LWR Fuel Performance/TopFuel/WRFPM Orlando, Florida, USA, September 26–29, 2010. Paper 006. – PP. 504-512.

18. *Молчанов В.Л., Панюшкин А.К., Железняк В.Н. и др.* Итоги создания и задачи дальнейшего совершенствования ТВС альтернативной конструкции для реактора ВВЭР-1000 / Сб. докл. VI Российской конференции по реакторному материаловедению, Димитровград, 11–15 сентября 2000. В 3-х томах. Т. 2. ч. 1. – Димитровград, 2001. – С. 53-66.

19. *Tyukin V.* Operational Experience of Fuel Assembly TVS-2 at Balakovo NPP. – Proceedings of the VIIth International Conference on VVER Fuel Performance, Modelling and Experimental Support, 17-21 September 2007, Albena Congress Center, Bulgaria. – PP. 139-145.

20. *Molchanov V., Starikov A., Samoilo O. et al.* Results of VVER-1000 TVSA Operation and Tendencies for Design Development. – Proceedings of the VII-th International Conference on WVER Fuel Performance, Modelling and Experimental Support, 17–21 September 2007, Albena Congress Center, Bulgaria. – PP. 218-222.

Поступила в редакцию 10.05.2016 г.

Автор

Павлов Сергей Владленович, научный руководитель ООО НПФ «Сосны»,
доктор техн. наук
E-mail: pavlov@sosny.ru