

## СТЕНД «КОРПУС» РЕАКТОРА РБТ-6. УСЛОВИЯ ОБЛУЧЕНИЯ. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ. РЕЗУЛЬТАТЫ

*В.Н. Голованов, В.М. Раецкий, В.В. Личадеев, А.Л. Петелин, В.В. Пименов,  
Н.В. Яшина*

*ФГУП ГНЦ РФ НИИАР, г. Димитровград, Россия;  
E-mail: adm@niiar.ru*

Представлены результаты совершенствования ампул стенда «Корпус», экспериментального и расчетного определения условий облучения материалов корпусов типа ВВЭР, использования стенда в российских и международных контрактах. Технология формирования условий облучения в стенде «Корпус» позволяет моделировать технологию формирования условий облучения образцов-свидетелей, металла корпусов ВВЭР-440, ВВЭР-1000 и ВВЭР-1500. Число и соотношение толщин слоев позволяет создать широкий спектр условий облучения материалов для фундаментальных исследований. Другими отличительными характеристиками условий облучения в ампулах стенда являются: возможность определения радиационного охрупчивания на толщине блока образцов, равной толщине корпуса реактора; представительные количества образцов; поддержание заданной температуры облучения блока образцов в интервале  $\pm 15^{\circ}\text{C}$  и каждого образца – в интервале  $\pm 5^{\circ}\text{C}$ . С использованием стенда выполнено два международных (EDF, Франция и МАГАТЭ – NRI, Республика Чехия) и два российских проекта, поддержанных Федеральным агентством по атомной энергии и Министерством науки и высшего образования.

Стенд «Корпус» для облучения образцов корпусных материалов реакторов ВВЭР размещается в отражателе реактора РБТ-6 со стороны грани активной зоны, свободной от органов СУЗ (рис. 1).

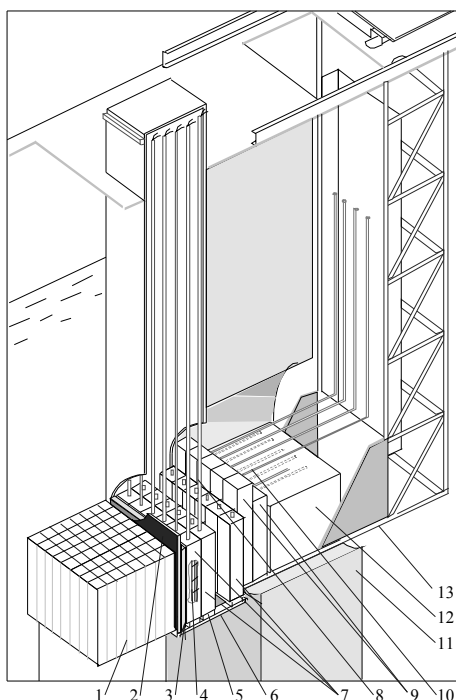
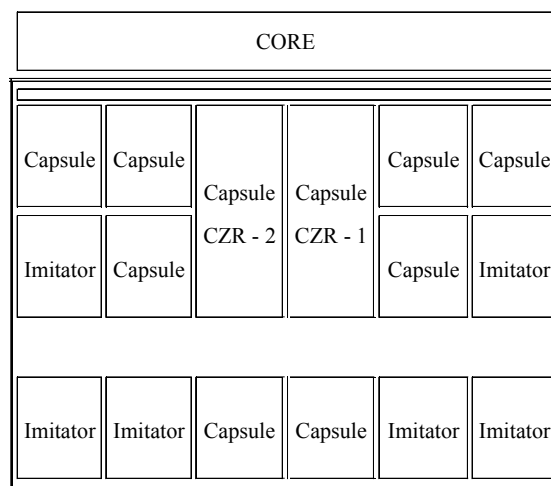


Рис. 1. Стенд «Корпус»

Часть стенда, устанавливаемая рядом с активной зоной (1), представляет собой жесткую металлическую выгородку (2) с разъемной опорной плитой (5). Толщина стенки выгородки равна 3 мм. Внутри выгородки на опорную плиту устанавливают ампулы различной конструкции (7, 9). Ампулы в поперечном сечении имеют одинаковую ширину 110 мм и

содержат образцы исследуемых материалов (4). В основной компоновке они устанавливаются рядами параллельно грани активной зоны по 6 штук в каждом с шагом 112 мм. Ампулы новой конструкции располагаются в 1 – 2 или 2 – 3 рядах стенда. Для уменьшения радиационного энерговыделения в образцах в выгородке расположен экран (3) из свинца толщиной 12 мм, очехлованного нержавеющей сталью толщиной 2 мм. Между экраном и массивом ампул, а также между рядами ампул могут быть созданы водяные зазоры различной толщины для моделирования условий облучения корпусов ВВЭР. Зазоры создаются путем перемещения опорных плит по направляющим (6). Для подачи напряжения на нагреватели ампул и для вывода сигналов термомпар используются коммуникационные выводы (8, 10). В бетонной перегородке (11) на передвижной платформе (13) установлен блок имитации закорпусного пространства (12).

Схема расположения ампул в стенде «Корпус»

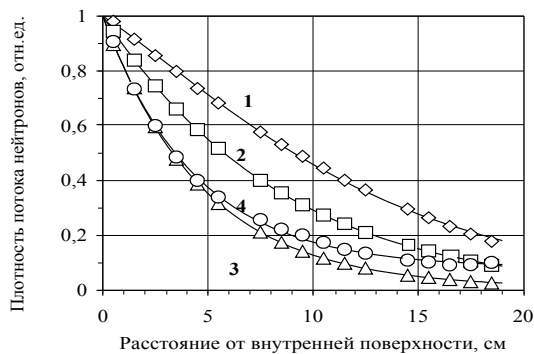


Условия облучения образцов приведены в таблице. Плотность потока нейтронов в рабочих объемах центральных ампул стенда «Корпус» в основной компоновке стенда определялась по активации мониторов флюенса в измерительных каналах ампул и в блоках образцов. Жирным шрифтом выделены результаты, полученные по измерению мониторов, облучавшихся в блоках образцов в течение полного цикла облучения.

**Плотность потока нейтронов в центре блока из стальных образцов и пластин при облучении в ячейках 14, 24, 34 стенда «Корпус»**

Ряд стенда, ячейка	Плотность потока нейтронов, $10^{17}\text{см}^{-2}\text{сут}^{-1} / 10^{12}\text{см}^{-2}\text{с}^{-1}$ , с энергией E, МэВ				Период, годы
	E>3,0	E>1,0	E>0,5	E>0,1	
1, 14	0,38 / 0,44	2,3 / 2,7	4,0 / 4,6	–	1997г.
	0,44 / 0,51	2,6 / 3,1	4,7 / 5,5	8,1 / 9,4	2000г.
	0,49 / 0,56	2,9 / 3,4	–	–	1995–2003гг.
2, 24	0,042 / 0,049	0,38 / 0,44	0,97 / 1,12	–	1997г.
	0,040 / 0,046	0,34 / 0,39	0,72 / 0,83	1,5 / 1,73	2000г.
	0,044 / 0,051	0,46 / 0,53	–	–	1995–2003гг.
3, 34	0,0016/0,0019	–	–	–	1997г.
	0,0018/0,0021	0,014/0,016	0,032/0,037	0,069/0,080	2000г.
	0,0022/0,0025	0,016/0,019	–	–	1995–2003гг.

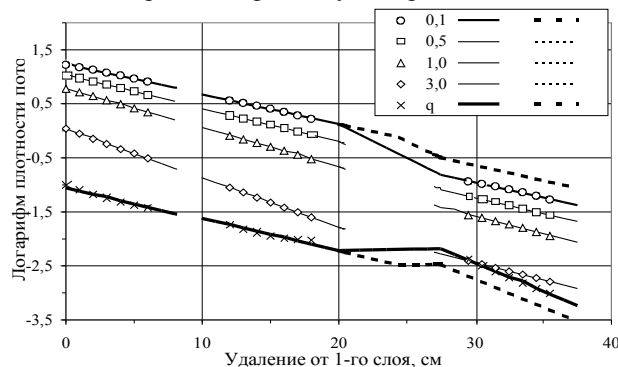
Нейтронно-физическое сопровождение облучаемых образцов включает оперативную активацию мониторов в измерительном канале ампулы и активацию мониторов в блоке образцов в течение всего облучения (рис. 2).



**Рис. 2.** Изменение плотности потока нейтронов (а) и отношения плотности потока нейтронов к радиационному энерговыделению (б); нейтронов с энергией: 1 –  $0,1 < E < 0,5$  МэВ; 2 –  $E > 0,5$  МэВ; 3 –  $E > 3,0$  МэВ; 4 – радиационное энерговыделение (а); нейтронов с энергией: 1 –  $E > 0,5$  МэВ; 2 –  $E > 1,0$  МэВ; 3 –  $E > 3,0$  МэВ [11](б)

Технология формирования условий облучения в стенде «Корпус» позволяет моделировать технологию формирования условий облучения образцов-свидетелей, металла корпусов ВВЭР-440, ВВЭР-1000 и ВВЭР-1500. Число и соотношение толщин слоев позволяет создать широкий спектр условий облучения материалов для прикладных и фундаментальных исследований.

Оперативная активация мониторов необходима для уточнения времени облучения образцов (с учетом изменения условий в результате перегрузок активной зоны) до поворотов и перегрузок ампул, суммарного времени облучения в каждой ориентации на активную зону реактора, для оценки общего времени облучения (рис. 3). Гарантируется выполнение условий контракта по флюенсу нейтронов.



**Рис. 3.** Изменение плотности потока нейтронов (логарифм  $\Phi \cdot 10^{-12}\text{см}^2/\text{с}$ ) с энергией  $< 0,1, 0,5, 1,0, 3,0$  МэВ и радиационного энерговыделения  $q$  (логарифм  $q \cdot \text{г}/\text{Вт}$ ) в рабочих объемах ампул первого, второго и третьего рядов при прохождении нейтронов через слои стали и воды стенда «Корпус». Точки – результаты расчетных исследований [11]; линии сплошные – интерполирование; пунктирные – моделирование экранирования корпуса образцами-свидетелями

Отличительными характеристиками условий облучения в ампулах стенда являются: возможность определения радиационного охрупчивания на толщине блока образцов, равной толщине корпуса реактора; представительные количества образцов; поддержание заданной температуры облучения блока

образцов в интервале  $\pm 15$  °С и каждого образца в интервале  $\pm 5$  °С. В ампулах квадратного сечения облучается набор образцов толщиной 60...70 мм. Одновременно могут быть облучены 5-7 первых слоев металла обечайки, включая слои, из которых основной металл отбирается для аттестационных исследований. В ампулах новой конструкции (рис. 4) прямоугольного сечения 110×230 мм облучается набор образцов толщиной до 200 мм.

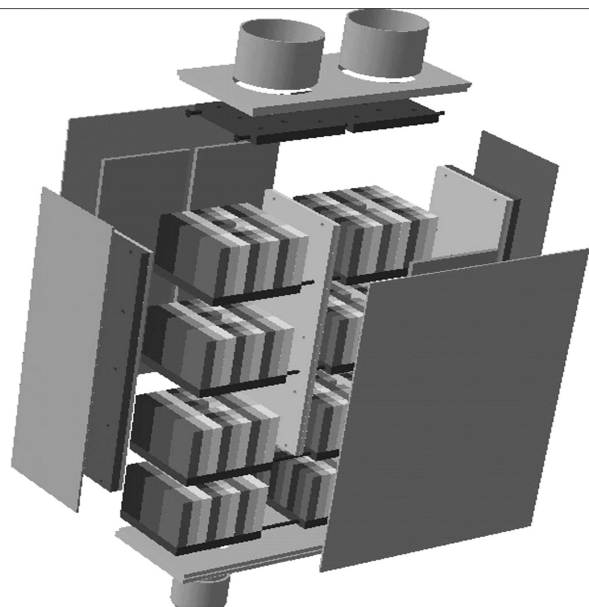


Рис. 4. Схема размещения образцов в ампуле новой конструкции для моделирования радиационного повреждения основного металла и металла сварного шва на полной толщине корпуса реактора типа ВВЭР

С использованием стенда выполнено два российских проекта, поддержанных Федеральным агентством по атомной энергии и Министерством науки и высшего образования. Определено радиационное охрупчивание основного штатного металла на полной толщине металла обечайки 190 мм (рис. 5) и штатного металла сварного шва на толщине 70 мм части обечайки, прилегающей к ее внутренней поверхности (рис. 6); ослабление радиационного охрупчивания штатного металла на свидетельствующие о возможности обоснования дальнейшей эксплуатации корпусов ВВЭР-1000.

Выполнено три международных проекта.

**Финляндия – Россия.** Проведено облучение с промежуточными отжигами, имитирующее режим эксплуатации корпусов реакторов ВВЭР-440.

**Франция (EDF) – Россия (НИИАР).** Проведено сравнение российских и французских нормативных требований по обоснованию радиационного ресурса металла корпусов реакторов (рис. 7).

Сравнение российских и французских нормативных кодов, регламентирующих определение свойств материалов корпусов реакторов с водой под давлением, проведено на штатном основном металле (ОС) и штатном металле сварного шва (СШ) корпуса ВВЭР-1000.

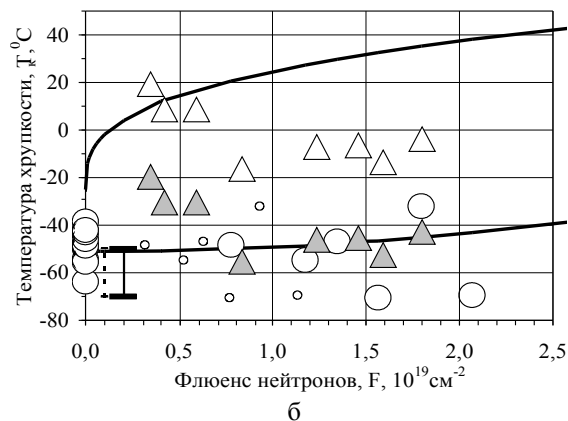
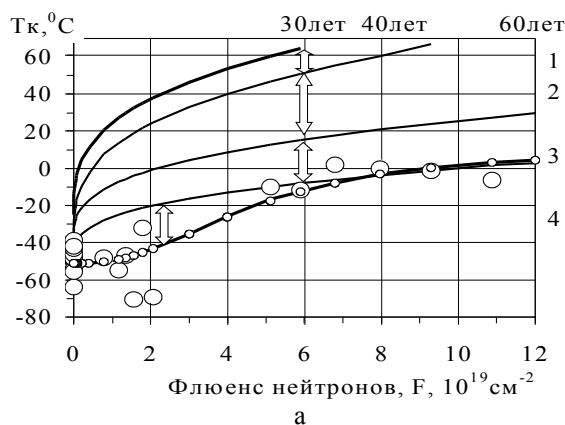


Рис. 5. Сопоставление ресурса основного металла для конкретного корпуса ВВЭР-1000 с проектным ресурсом: указаны (1-4) составляющие «отложенного ресурса», превышающего по времени эксплуатации 20-40 лет (а); изменение критической температуры хрупкости основного металла корпуса ВВЭР-1000, сталь 15Х2НМФА, в результате облучения в стенде «Корпус» (кружки) и образцов-свидетелей украинских АЭС [7] (треугольники); линии: верхняя – гарантированные значения по нормативному соотношению; нижняя – по соотношению, описывающему значения  $T_k$  при  $n$ -кратном повторении или совпадении повреждающих событий (б)

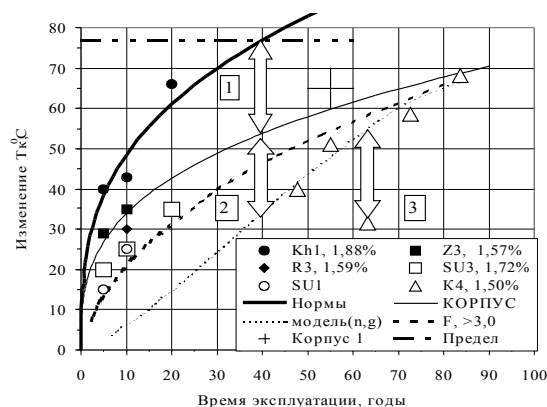


Рис. 6. Сравнение изменения критической температуры хрупкости штатного металла сварного шва (точки) по образцам, облученным в стенде «Корпус», и по образцам-свидетелям украинских и других АЭС. Линии – интерполирование результатов в рамках материаловедческих моделей. Указаны составляющие «отложенного ресурса»

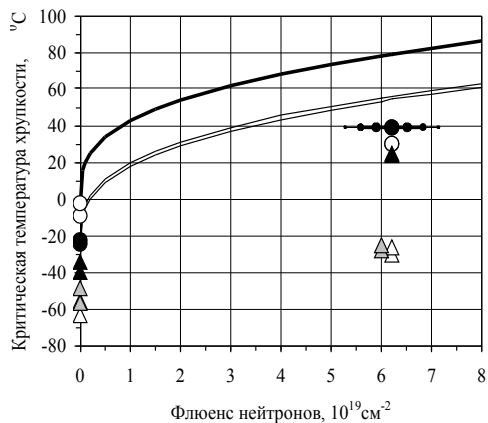


Рис. 7. Сравнение российских и французских нормативных кодов: изменение критической температуры хрупкости штатного металла: основного (O по RCCM, Δ по ГОСТ), зоны термического влияния (Δ, точки заштрихованы) и сварного шва (O по RCCM, Δ по ГОСТ, точки залиты) в результате облучения. Линии – гарантированные значения: верхняя – для металла сварного шва, нижняя – для основного металла. Указаны погрешности определения флюенса нейтронов 5, 10, 15%

Образцы Шарпи для испытаний на ударный изгиб были изготовлены в соответствии с требованиями российских и французских нормативных документов и отличались ориентацией продольной оси и различным расстоянием от места вырезки образцов до внутренней поверхности обечайки. Были изготовлены также образцы из металла зоны термического влияния (ЗТВ) по требованиям российских нормативных документов.

**МАГАТЭ – Республика Чехия (NRI) – Россия (НИИАР).** На ампуле новой конструкции проведено моделирование радиационного охрупчивания основного металла и металла сварного шва реактора ВВЭР-1000, а также эталонного металла JRQ в условиях изменения плотности потока и энергетического спектра нейтронов и гамма-излучения на полной толщине стенки корпуса реактора ВВЭР-1000 (рис. 8).

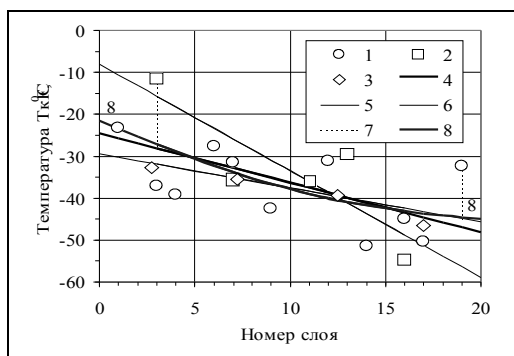


Рис. 8. Уменьшение критической температуры хрупкости основного металла, сталь 15X2НМФА, при удалении слоя от активной зоны; точки – экспериментальные значения: 1 и 2 – для слоев массивов A(1-11) и A(5,7); 3 – для первой, второй, третьей, четвертой четвертой толщины обечайки, выбор параметров A, B, T0, C; линии: 4, 5 и 6 – линейное интерполирование значений ТкF массивов (A(1-11) + A(5,7)), A(1-11) и A(5,7); 7 – изменения ТкF при введении предположений; 8 – интерполирование по (3.3)

Проведены сличительные эксперименты по определению условий облучения в стенде и по испытанию облученных образцов Шарпи на ударный изгиб. Получен большой объем облученных образцов корпусных материалов (различных исходных состояний) для дальнейших верификационных прикладных исследований и заключений.

В настоящее время выполняется международный проект, приостановлено выполнение двух российских проектов из-за прекращения финансирования, рассматриваются планы по двум российским проектам.

### ВВЭР-1500

На стенде может быть организовано опережающее сопровождение эксплуатации корпуса ВВЭР-1500 (ВВЭР-1800). Состояния металла, соответствующие первому, второму и третьему обследованиям реакторной установки после 8, 16 и 24 лет эксплуатации, могут быть получены в течение 1,5; 3 и 5 лет облучения образцов.

В компоновке с расположением ампулы новой конструкции в первом – втором ряду и штатной ампулы в третьем ряду стенда «Корпус» на первом слое образцов в ампуле третьего ряда опережение по плотности потока нейтронов с энергией  $E > 0,5$  МэВ равно 6:1. Скорость набора флюенса нейтронов  $1,5 \cdot 10^{18}$  см<sup>2</sup>/год.

### ВВЭР-1000

Если предпочтение будет отдано экспериментам по проектам ВВЭР-1000 и ВВЭР-640, может быть создана новая компоновка стенда. В новой компоновке вследствие увеличения водяного зазора между ампулами первого и второго рядов на образцах первого слоя в ампуле второго ряда может быть создано опережение по скорости набора флюенса равно 6:1. Скорость набора флюенса  $\sim 9 \cdot 10^{18}$  см<sup>2</sup>/год. В течение 6-7 лет может быть набран проектный флюенс нейтронов ( $E > 0,5$  МэВ).

При удалении от активной зоны и увеличении ширины водяного зазора плотность потока  $\Phi_{0,1}$  (часто используемая при описании изменения свойств конструкционных материалов в результате облучения) уменьшается, радиационное энерговыделение  $q$  уменьшается медленнее (см. рис. 2,а), отношение  $\Phi_{0,1}/q$  имеет максимум (см. рис. 2,б). Стенд может быть использован при подготовке специалистов для атомной энергетики, например для выполнения дипломных проектов, решающих частные задачи по подтверждению ресурса корпусов реакторов ВВЭР-1000 и ВВЭР-1500 (ВВЭР-1800), по оптимизации условий эксплуатации корпусов этих реакторов.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты исследований и разработок 1999-2004 гг. показывают, что стенд «Корпус» и материаловедческий комплекс ФГУП ГНЦ РФ НИИАР могут быть полезны в решении следующих вопросов безопасной и эффективной эксплуатации действующих реакторов ВВЭР-1000 и реакторов нового поколения:

- обоснование продления эксплуатации корпусов реакторов ВВЭР-1000;
- опережающее сопровождение эксплуатации головного реактора ВВЭР-1500;
- определение предельного ресурса металла корпусов ВВЭР-640, ВВЭР-1000, ВВЭР-1500;
- уточнение закономерностей изменения свойств корпусных материалов при изменении плотности потока и энергетического спектра реакторных излучений;
- обобщение опыта построения прогнозов по ресурсу корпусов ВВЭР-1000 и уточнению нормативных требований.

Испытания и исследования, выполненные по разделу «Корпусные материалы» Программы «Реакторное материаловедение» в 1995–2005 гг. с использованием стенда «Корпус», показали, что экспериментальные возможности стенда соответствуют современным задачам реакторного материаловедения по программе корпусов ВВЭР.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. В.А. Цыканов, В.М. Раецкий, В.Н. Голованов и др. Моделирование радиационного охрупчивания металла корпуса реактора ВВЭР-1000 на стенде КОРПУС реактора РБТ-6 // *Сб. докл. XII Ежегодной конф. Ядерного общества России «Исследовательские реакторы: наука и высокие технологии», 25-29 июня 2001 г.* Димитровград: ГНЦ РФ НИИАР. 2002, т. 3, ч. 2, с. 167–187.
2. В.Н. Голованов, В.М. Раецкий, Д.В. Козлов, В.А. Красноселов, В.В. Личадеев, В.В. Пименов, В.И. Прохоров. Использование стенда КОРПУС в работах по определению остаточного ресурса и обоснованию возможности продолжения эксплуатации сверх установленного срока корпуса ВВЭР // *Международная конференция (МНТК-2002) «Безопасность, экономика и эффективность атомной энергетики», г. Москва, Росэнергоатом, 18-19 апреля 2002 г.*
3. В.Н. Голованов, В.М. Раецкий, Д.В. Козлов и др. Использование стенда «Корпус» в работах по определению остаточного ресурса и обоснованию возможности продолжения эксплуатации сверх установленного срока корпуса ВВЭР-1000 // *Proceedings of the 17-th international conference on material issues in design, manufacturing and operation of nuclear power plants equipment, 17-21 June 2002, St. Petersburg: CRISM “Prometey”. 2002, v. 1, p. 197–216.*
4. V.N. Golovanov, V.M. Raetsky, D.V. Koslov et al. The KORPUS facility in determination of residual life and validation of possible prolongation of the VVER-1000 vessel operation beyond the designed service life // *International Symposium on Nuclear Power Plant Life Management, Budapest, Hungary, 4-8 November 2002. Book of Extended Synopses, IAEA-CN-92, p. 167–168.*
5. В.Н. Голованов, В.М. Раецкий, Д.В. Козлов и др. Использование стенда «Корпус» в работах по определению остаточного ресурса и обоснованию возможности продолжения эксплуатации сверх установленного срока корпуса ВВЭР-1000 // *Тезисы докл. VII Российской конференции по реакторному материаловедению.* Димитровград: ФГУП ГНЦ РФ НИИАР. 2003, с. 205–206.
6. Радиационное охрупчивание металла сварного шва реактора ВВЭР-1000 // *Сб. трудов III Научно-технической конференции «Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР», г. Подольск, 26-30 мая 2003 г.* ФГУП ОКБ «Гидропресс».
7. И.Н. Вишневский, Э.У. Гриник, Л.И. Чирко, О.В. Дроганов, В.Н. Ревка, Ж. Фокт, К. Тролля. Радиационное охрупчивание корпусных сталей Украинских АЭС // *Труды XIV Международной конференции по физике радиационных явлений и реакторному материаловедению. 12-17 июня 2000г., г. Алушта, Крым.* Харьков: ННЦ ХФТИ, 2000, с. 94–95.
8. E.U. Grynuk, V.D. Gukalova, L.I. Chyrko, V.N. Revka, A. Ballesteros, L. Debarberis, A. Kryukov. Results from Surveillance Programme and Their Analysis // *IAEA/LMNPP, Specialists Meeting: Irradiation Embrittlement and Mitigation, Gloucester, England, UK 14-17 MAY 2001.*
9. В.Н. Голованов, Д.В. Козлов, В.И. Прохоров, В.М. Раецкий, В.К. Шамардин, В.А. Красносёлов, Ж.П. Массу, К. Тролля, Р. Берtrand. Сравнение российских и французских нормативных методик определения радиационного охрупчивания корпусов реакторов с водой под давлением // *V Международная конференция «Вклад работ по исследованию материалов в решение проблем, встречающихся в реакторах с водой под давлением», г. Фонтенвро, Франция, 23-27 сентября 2002 г.* Proceeding, v. 2, p. 715–729.
10. M. Brumovský, V.N. Golovanov, V.V. Lichadeev, V.M. Raetsky, A.L. Petelin, V.N. Lyssakov. Attenuation of radiation damage and neutron field in rpv wall // *IAEA technical cooperation project IAEA Specialists' Meeting On Radiation Damage Gus Khrustalny, May 24-27, 2004.*
11. M. Brumovsky, M. Kytka, M. Marek, P. Novosad, V.N. Golovanov, V.V. Lichadeev, V.M. Raetsky, A.L. Petelin, V.N. Lyssakov. Attenuation of radiation damage and neutron field in RPV wall // *The Proceedings of the International Workshop «Influence of Atomic Displacement Rate on Radiation-Induced Ageing of Power Reactor Components: Experiment and Modeling». 3-7 October 2005, Ulyanovsk.*

**СТЕНД “КОРПУС” РЕАКТОРА РБТ-6.  
УМОВИ ОПРОМІНЕННЯ. ВИКОРИСТАННЯ. РЕЗУЛЬТАТИ**

*В.М. Голованов, В.М. Раєцький, В.В. Личадеєв, А.Л. Петелін, В.В. Піменов, Н.В. Яшина*

Представлено результати вдосконалювання ампул стенда «Корпус», експериментального й розрахункового визначення умов опромінення матеріалів корпусів типу ВВЕР, використання стенда в російських і міжнародних контрактах. Технологія формування умов опромінення в стенді КОРПУС дозволяє моделювати технологію формування умов опромінення зразків-свідків, металу корпусів ВВЕР-440, ВВЕР-1000 і ВВЕР-1500. Число й співвідношення товщин шарів дозволяє створити широкий спектр умов опромінення матеріалів для фундаментальних досліджень. Іншими відмітними характеристиками умов опромінення в ампулах стенда є: можливість визначення радіаційного окрихчування на товщині блоку зразків, рівній товщині корпусу реактора; представницькі кількості зразків; підтримка заданої температури опромінення блоку зразків в інтервалі  $\pm 15^{\circ}\text{C}$  и кожного зразка - в інтервалі  $\pm 5^{\circ}\text{C}$ . З використанням стенда виконано два міжнародних (EDF, Франція й МАГАТЕ - NRI, Республіка Чехія) і два російських проекти, підтриманих Федеральним агентством по атомній енергії й Міністерством науки й вищого утворення.

**KORPUS TESTING FACILITY IN RBT-6.  
IRRADIATION CONDITIONS. USE. RESULTS**

*V.N. Golovanov, V.M. Rayetsky, V.V. Lichadeev, A.L. Petelin, V.V. Pimenov, N.V. Yashina*

The paper describes the results of upgrading the KORPUS facility capsules, experimental and calculated determination of the irradiation conditions of the VVER type vessel materials, the use of the testing facility into the Russian and international contracts. The opportunity to form irradiation conditions in KORPUS makes it possible to simulate the irradiation conditions of the witness-samples, metal of the VVER-440, VVER-1000 and VVER-1500 vessels. The number and proportion of the layer thicknesses make it possible to create a wide spectrum of material irradiation conditions for fundamental research. The other distinctive features of the irradiation conditions in the facility capsules are: determination of radiation embrittlement in the thickness of the samples set that is equal to the thickness of the reactor vessel; representative sample quantities; maintenance of the given irradiation temperature for a set of samples in the range of  $\pm 15^{\circ}\text{C}$  and for each sample in the range of  $\pm 5^{\circ}\text{C}$ . The testing facility was involved in two international (EDF, France and IAEA – NRI, Czechia) and two Russian projects supported by the Federal Agency on Atomic Energy and the Ministry of Science and High Education.