

International Workshop

“Influence of Atomic Displacement Rate on Radiation-Induced Ageing of Power Reactor Components: Experimental and Modeling”

(October 3-7, Ulyanovsk, Ulyanovsk State University)

ЭКСПЕРИМЕНТ ПО УТОЧНЕНИЮ КИНЕТИКИ
РАДИАЦИОННОГО ОХРУПЧИВАНИЯ МЕТАЛЛА
НА ТОЛЩИНЕ КОРПУСА РЕАКТОРОВ ВВЭР-1000 И ВВЭР-1500
ДЛЯ УТОЧНЕНИЯ СТЕПЕНИ КОНСЕРВАТИЗМА

ПРОЕКТНЫХ РЕШЕНИЙ

В.Н. Голованов, В.М. Раецкий

ФГУП «ГНЦ РФ НИИАР»

EXPERIMENTAL VALIDATION
OF THE RADIATION KINETICS OF
METAL EMBRITTLEMENT OVER THE THICKNESS
OF THE VVER-1000 AND VVER-1500 REACTOR VESSELS
TO SPECIFY THE CONSERVATISM DEGREE OF
THE PROJECT SOLUTIONS

Доклад был представлен на МНТК-2005 (ISTC-2005) 23-25 мая 2005, г. Подольск

Цели выступления

Objects of report

- **Представить:**

1. результаты, подтверждающие значимость радиационно-стимулированного старения материалов корпусов ВВЭР в снижении радиационного ресурса;
2. характеристики стенда КОРПУС, обеспечивающие проведение представительных экспериментов по теме Совещания;
3. схемы экспериментов по влиянию плотности потока реакторных излучений на состояние металла.

- **To present:**

1. results confirming the importance radiation-induced of Ageing of materials of ring VVER in decrease of a radiating resource;
2. characteristics of the KORPUS facility ensuring realization of representative experiments on a subject of Workshop;
3. schemes of experiments on influence of density of a flow реакторных of radiations on condition of metal.

Влияние характеристик реакторных излучений

Influence of reactor irradiation characteristics

Различные компоненты реакторного излучения стимулируют:

- распад (старение) твёрдых растворов;
- создание и отжиг радиационных дефектов.

Интенсивность и состав потока излучений изменяется на толщине корпуса реактора \equiv на толщине блока образцов.

Этот эффект используется в модельных эффектах.

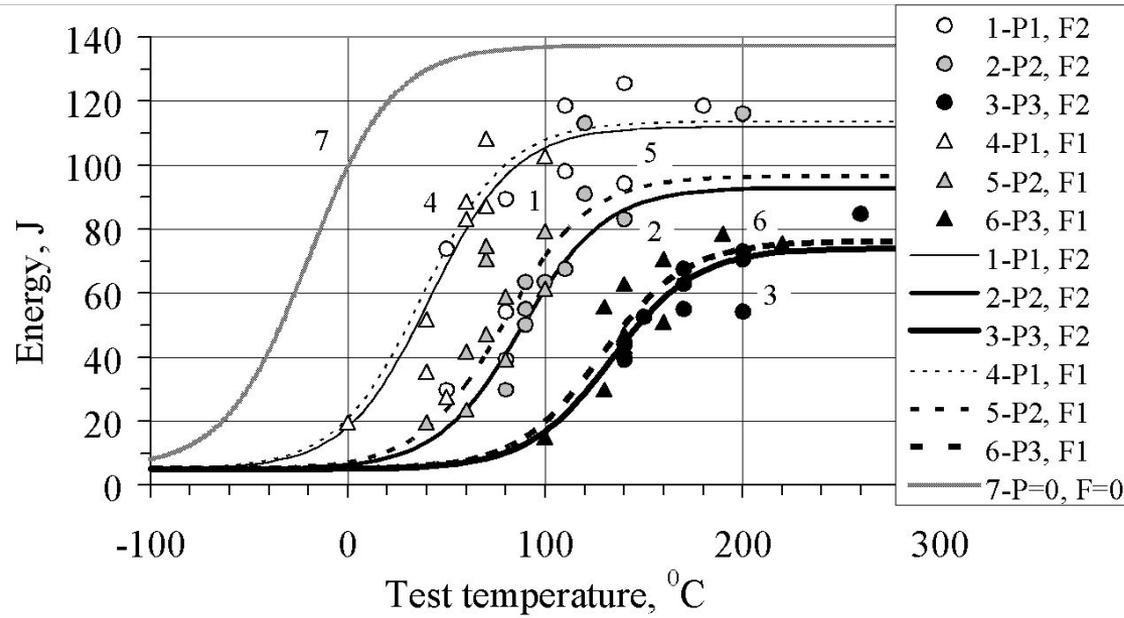
Different components of reactor irradiation stimulate:

- decomposition (ageing) of solid solutions;
- generation and annealing of radiation defects.

The intensity and composition of the emission flux over the reactor vessel thickness \equiv over the block of specimens thickness.

This effect is used in the model experiments.

Распад твёрдых растворов Decomposition of solid solutions



Фосфор в твёрдом растворе
Phosphorus in solid solution
 $dP/dt = -aP^f$; $P = P_0 \cdot \exp(-aft)$

Фосфор на дислокациях и в комплексах
Phosphorus on dislocations and in complexes

$P_0 - P = P_0(1 - \exp(-aft))$

$$E = A(P_0, F, T_{\text{обл}}, Cu) + B(\dots) \cdot \text{th}\{[T - T_0(P_0, F, T_{\text{обл}}, Cu)] / C(\dots)\},$$

где A, B, T_0, C – параметры, зависящие от содержания фосфора P , флюенса нейтронов $F = ft$, температуры облучения $T_{\text{обл}}$ и содержания меди Cu ; T – температура испытания (parameters dependent on the content of phosphorus P , fluence of neutrons F , temperature of irradiation T_{ir} , content of cuprum Cu , T - temperature of test).

Основной эффект описывается (линии) при учёте зависимости параметров (the main effect is described accounting the dependence of parameters (lines)):

$$A = A_0 + k_a \cdot P_0 \cdot \{1 - \exp[-F \cdot v \cdot \exp(-Q/kT)]\} \text{ и } T_0 = T_0 + k_t \cdot P_0 \cdot \{1 - \exp[-F \cdot v \cdot \exp(-Q/kT)]\}.$$

Сборник тезисов докладов МНТК-2005. ФГУП ОКБ «Гидропресс», Подольск, 2005, С.175-176.

Составляющие ресурса основного металла для корпуса ВВЭР-1000 по сравнению с проектом

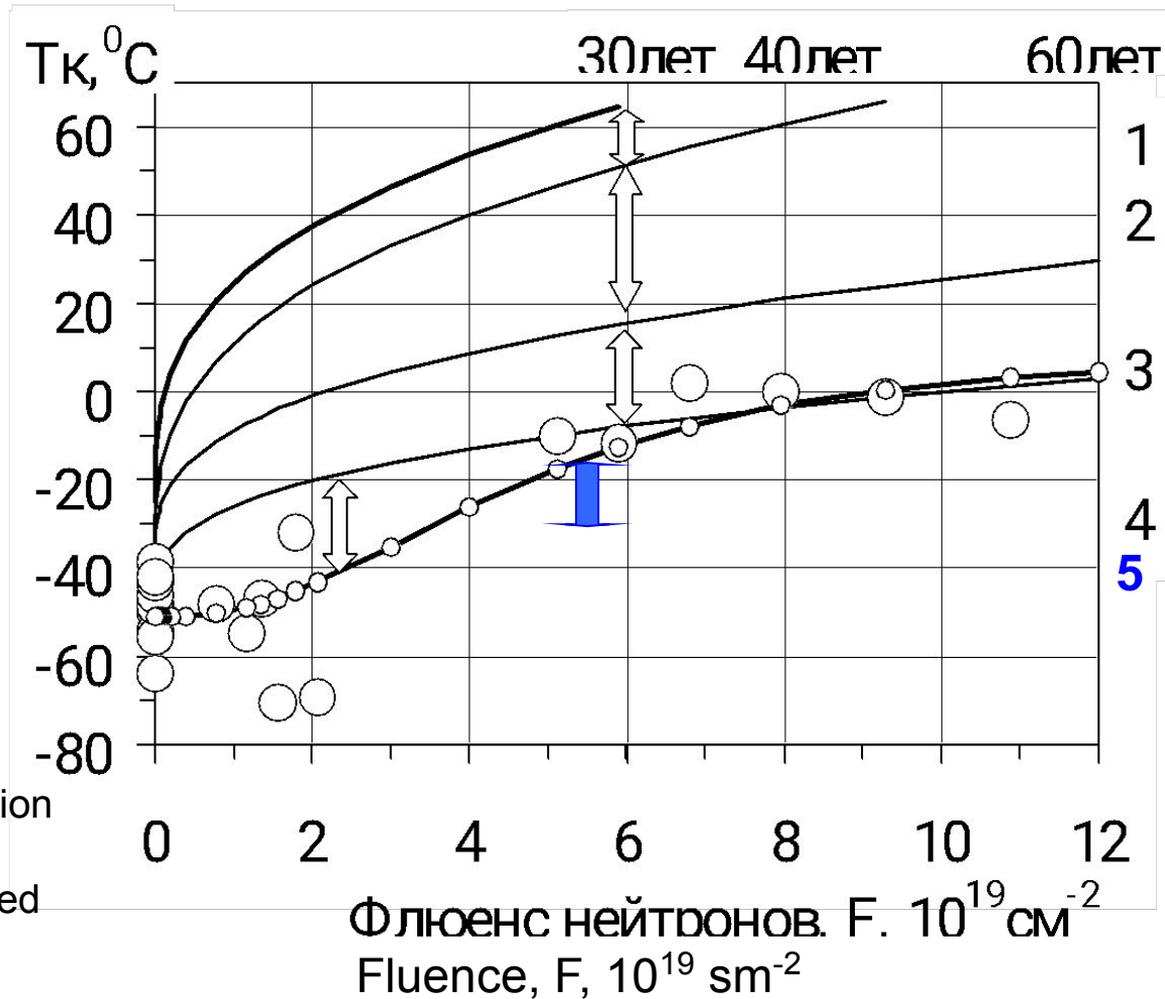
Components of the base metal lifetime for the VVER-1000 vessel in comparison to the project

Для конкретного корпуса ВВЭР

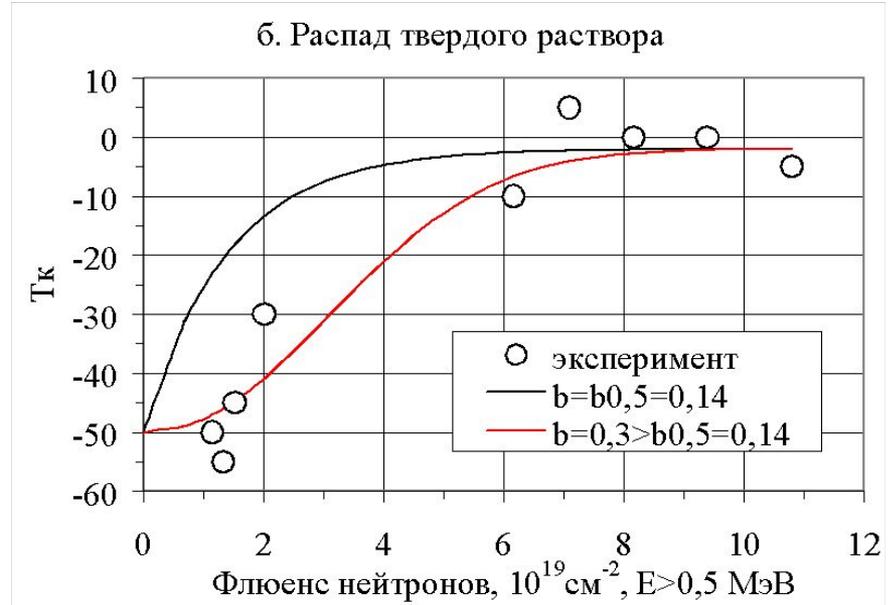
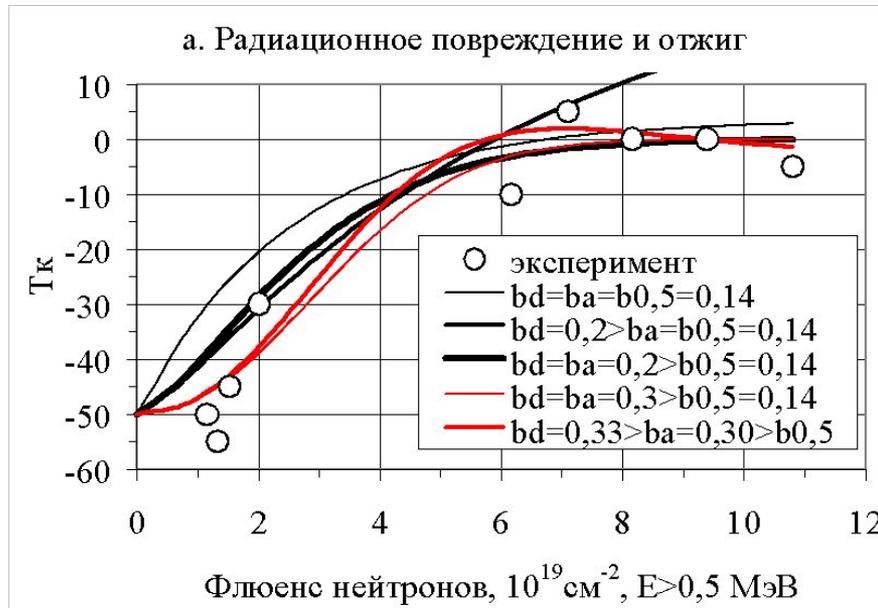
- 1 - T_{K_0}
- 2 - A_F
- 3 - погрешности определения на малых сериях образцов
- 4 - вид зависимости от условий облучения
- 5 - T_{K_F} в вершине расчётной трещины

For the certain VVER vessel

- 1 - T_{C_0}
- 2 - A_F
- 3 - error for a small series of specimens
- 4 - kind of dependence to irradiation conditions
- 5 - T_{K_F} at the peak of the calculated crack



Создание и отжиг радиационных дефектов Generation and annealing of radiation defects



Изменение относительной интенсивности потока частиц, создающих и отжигающих радиационные дефекты, и флукса нейтронов, $E > 0,5 \text{ МэВ}$, проявляется в изменении вида функциональной зависимости радиационного охрупчивания в результате: а. накопления дефектов; б. распада твердого раствора.

The change of relative intensity of a flux of particles generation and annealing of radiation defects, and flux of neutrons, $E > 0,5 \text{ MeV}$, is shown in change of functional dependence of radiating of metal embrittlement in result: а. accumulation of defects; б. disintegration of a solid solution.

Составляющие ресурса металла сварного шва

Components of the welded joint metal lifetime



Для конкретного корпуса ВВЭР

- 1 - Состояние металла.
- 2 - Вид зависимости от условий облучения.
- 3 - Влияние никеля на радиационное охрупчивание.
- 4 - T_{kF} в вершине расчётной трещины.

For certain VVER vessel

- 1 - Condition of metal.
- 2 - Kind of dependence to the irradiation condition.
- 3 - Influence of nickel on the radiation embrittlement.
- 4 - T_{kF} at the peak of calculated crack/

Изменение критической температуры хрупкости T_{kF} штатного металла сварного шва корпуса реактора ВВЭР-1000 (Ni 1,5-1,7%) при облучении образцов в стенде КОРПУС и образцов – свидетелей адекватно.

Change of critical temperature T_{kF} of base metal brittleness of a welded joint of the VVER-1000 vessel (Ni 1,5-1,7 %) under the same irradiation of specimens in the KORPUS facility and surveillance specimens.

Компоновки стенда КОРПУС

The KORPUS facility arrangement

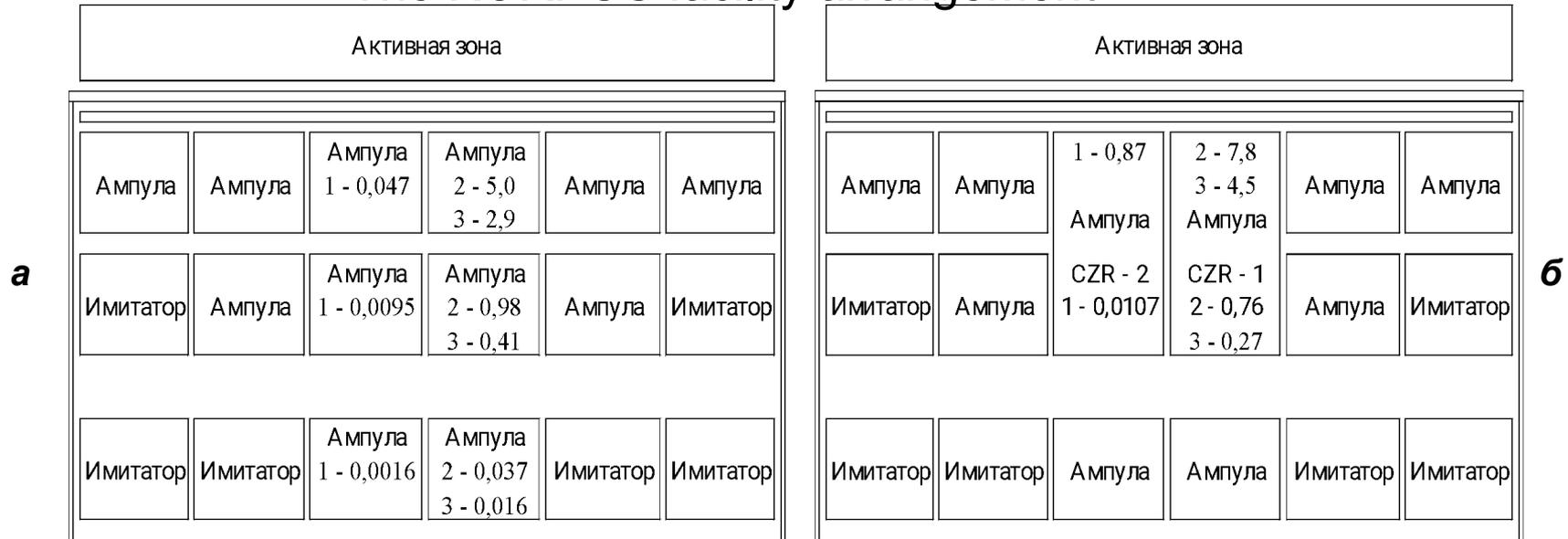


Схема расположения ампул традиционной **(а)** и новой **(б)** конструкции в стенде КОРПУС

Ампула - образцы стали ВВЭР по Программе реакторного материаловедения.

CZR-1 и **CZR-2** – образцы сталей NRI, Ржеж, Республика Чехия. **Имитатор** - сталь.

1 - радиационное энерговыделение, Вт/г;

2 и **3** - плотность потока нейтронов с энергией $E > 0,5$ МэВ и $E > 1,0$ МэВ, $10^{12}\text{см}^{-2}\text{с}^{-1}$

на рис. **а** для среднего слоя образцов, на рис. **б** для первого и 19-го слоя образцов.

Arrangement of capsules of standard (a) and new (б) design in the KORPUS facility

Capsule - specimens of VVER steel under the material science Program.

CZR-1 and CZR-2 - steel specimens of NRI, Rzez, Czech Republic. **Simulator** - steel.

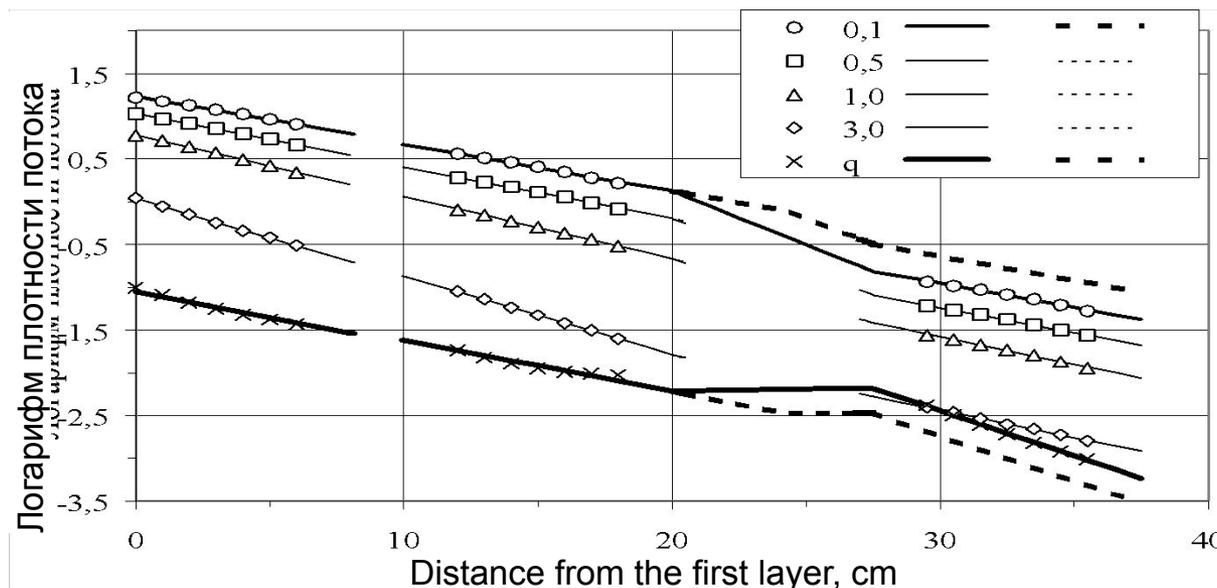
1 – radiation energy release , W/g;

2 and **3** – neutron flux density with energy $E > 0,5$ MeV and $E > 1,0$ MeV, $10^{12}\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$

fig. **а** - average layer of specimens, fig. **б** - first and 19th layer of specimens. 9

Моделирование экранирования образцами-свидетелями

Modeling of screening by surveillance specimens



Изменение плотности потока нейтронов (логарифм $F \cdot 10^{-12} \text{ см}^2 \text{ с}$) с энергией $E > 0,1; 0,5; 1,0; 3,0$ МэВ и радиационного энерговыделения q (логарифм $q \cdot \text{г/Вт}$) в ампулах 1-го, 2-го и 3-го ряда в стенде КОРПУС. Точки – результаты расчётных исследований [11, 21, 22];

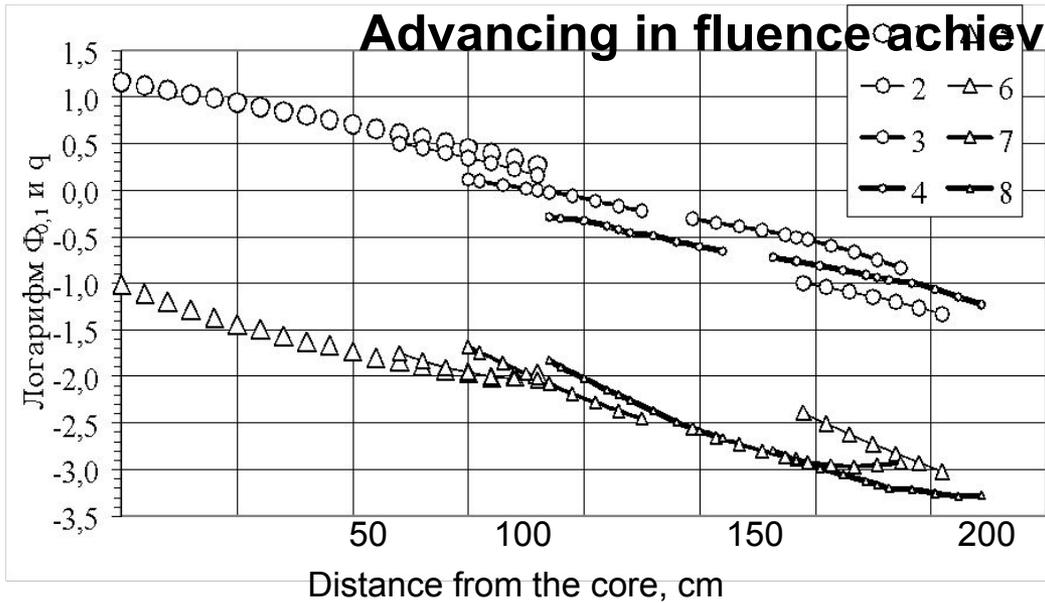
Пунктирные линии – моделирование экранирования корпуса образцами–свидетелями.

Change of density of the neutron flux (logarithm $F \cdot 10^{-12} \text{ см}^2 \text{ с}$) with energy $E > 0,1; 0,5; 1,0; 3,0$ MeV and radiating allocation of energy q (logarithm $q \cdot \text{г/Вт}$) in ampoules 1, 2 and 3 number(line) in the KORPUS facility . Points - results of settlement researches [11, 21, 22];

Dotted lines - modelling of shielding of the case by the specimens-surveillance.

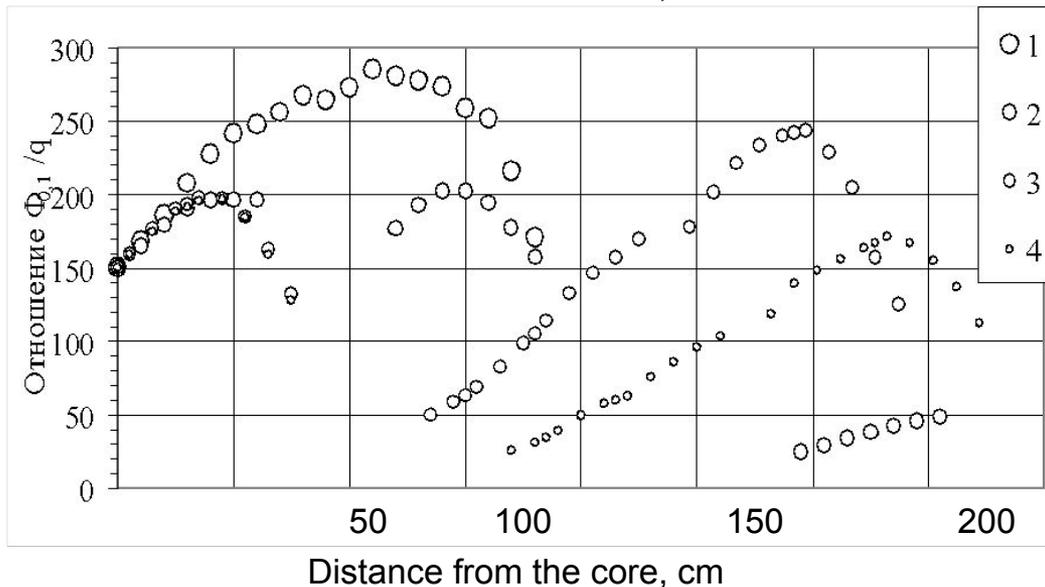
Опережение по скорости набора флюенса 6:1

Advancing in fluence achievement speed 6:1



a

Изменение логарифма плотности потока нейтронов $\Phi_{0,1}$, $10^{12} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$, $E > 0,1$ МэВ, (а, 1–4), радиационного энерговыделения q , Вт/г, (а, 5–6), и отношения $\Phi_{0,1}/q$, $10^{13} \text{ г см}^{-2} \text{ с}^{-1} \text{ Вт}^{-1}$, (б) в зависимости от удаления от активной зоны и ширины водяного зазора (3 на пред. слайд)
 1, 5 – 0 мм; 2, 6 – 10 мм;
 3, 7 – 40 мм; 4, 8 – 75 мм.



б

Change of the logarithm of neutron flux density $\Phi_{0,1}$, $10^{12} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$, $E > 0,1$ MeV, (а, 1 - 4), radiation energy q , Вт/г, (а, 5 - 6), and relation $\Phi_{0,1}/q$, $10^{13} \text{ г см}^{-2} \text{ с}^{-1} \text{ Вт}^{-1}$, (б) depending on the distance from the core and width of the water gap (3 on the previous slide):
 1, 5 - 0 mm; 2, 6 - 10 mm;
 3, 7 - 40 mm; 4, 8 - 75 mm.

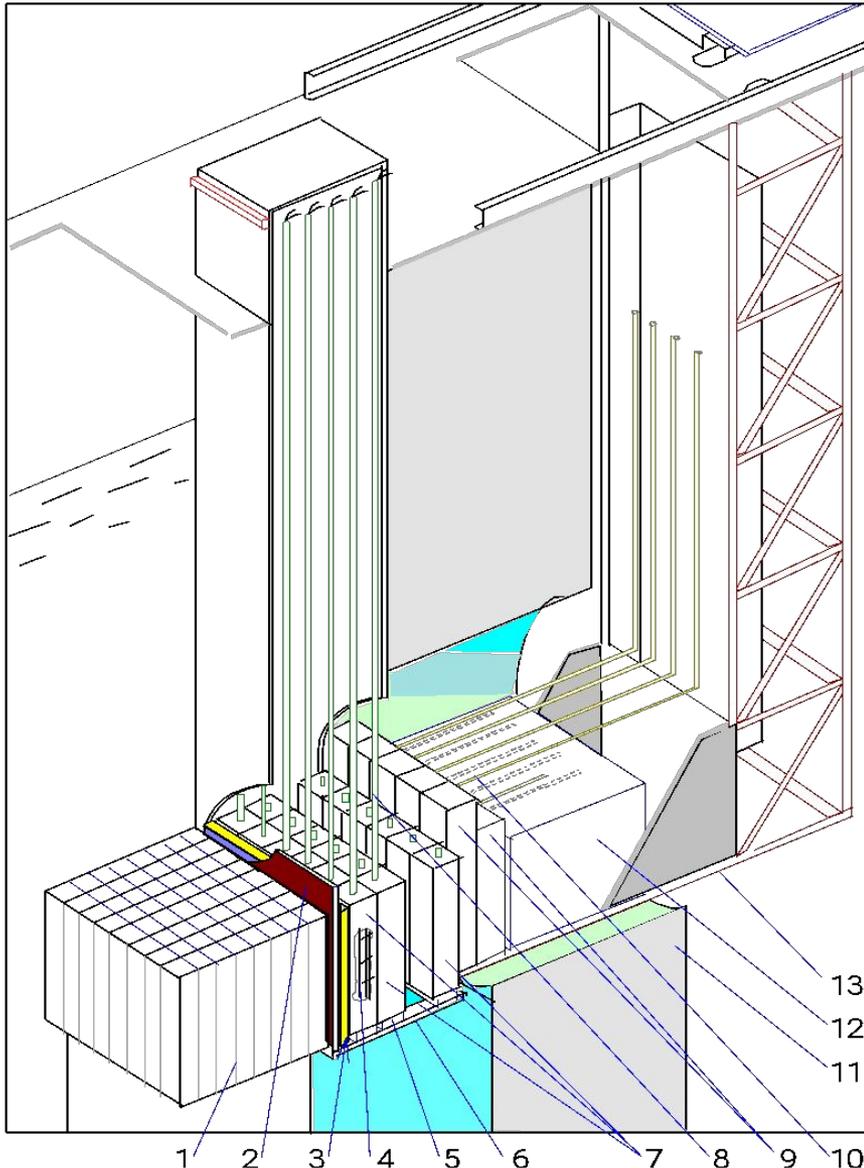
Заключение

Conclusion

1. Старение твёрдых растворов на основе металла корпусов ВВЭР стимулируется потоком реакторных излучений. Эффект сравним с эффектом от накопления радиационных дефектов.
 2. Состав потока реакторных излучений влияет на соотношение вкладов старения металла и накопления радиационных дефектов.
 3. На стенде КОРПУС создан широкий диапазон условий облучения для моделирования эффектов радиационного повреждения металла корпусов ВВЭР и разделения эффектов скорости повреждения, энергетического спектра и соотношения составляющих потока реакторных излучений.
-
1. Ageing of solid solutions based on the VVER vessel metals is stimulated by the reactor emission flux. The effect can be compared to that of the radiation defect accumulation;
 2. Composition of the reactor emission flux influences greatly on the correlation of metal ageing and accumulation of radiation defects.
 3. KORPUS facility provides for the wide range of irradiation conditions to simulate effects of radiation damage of the VVER vessel metal as well as damage rate effects, power spectrum and correlation of the flux components.

3.1.

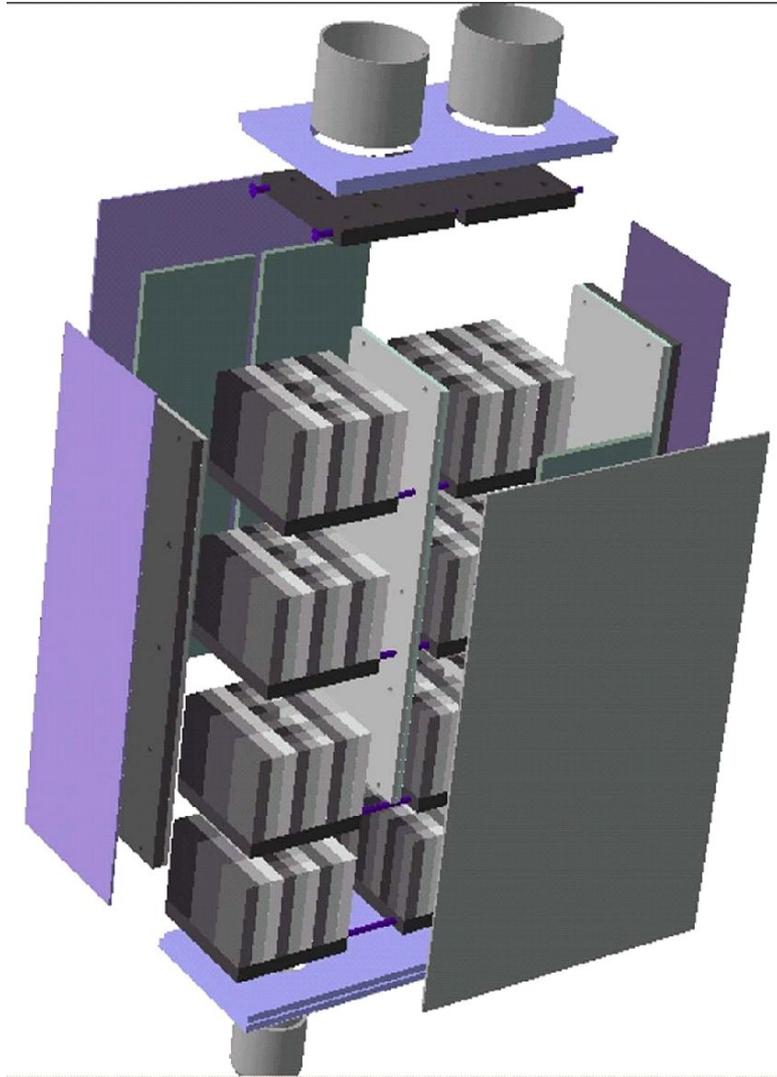
Схема станда КОРПУС



- Стенд КОРПУС
- 1** - активная зона, **2** - выгородка,
- 3** - экран, **4** - образцы, **5** – опорная плита для установки ампул ряда,
- 6** - направляющие, по которым перемещаются опорные плиты с ампулами,
- 7** - ампулы 1-го типа с образцами,
- 8** – коммуникационные выводы от ампул 1-го типа, **9** - ампулы 2-го типа с образцами,
- 10** – коммуникационные выводы от ампул 2-го типа, **11** – бетонная перегородка с цилиндрической нишей, **12** - блок имитации закорпусного пространства,
- 13** – передвижная платформа.

- KORPUS facility
- 1** - core, **2** - partition,
- 3** - shield, **4** - specimens, **5** - support plate to locate a row of capsules,
- 6** – guides to move the support plates with capsules, **7** – 1st type capsules with specimens, **8** – communications
- From the 1st type capsules,
- 9** – 2nd type capsule with specimens,
- 10** - communications from 2nd type capsules
- , **11** - concrete partition with a cylindrical niche, **12** - block to model the out of vessel space
- , **13** - mobile platform.

Ампула новой конструкции

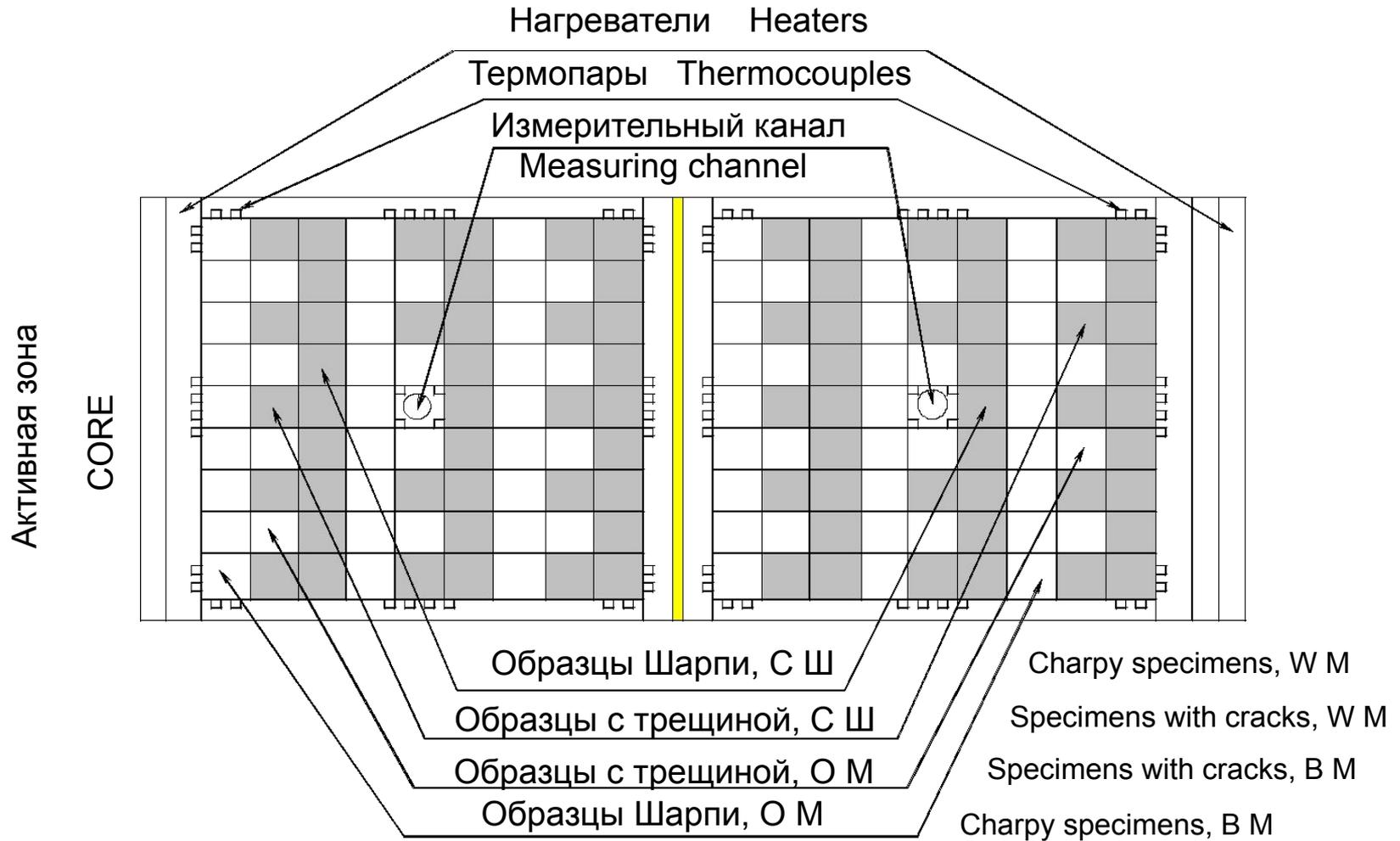


Capsule of a new design

- В ампуле размещается блок образцов Шарпи толщиной в 180 мм
 - На одном уровне ампулы размещается 160 образцов
 - Испытания прошли успешно
-
- A block of Charpy specimens 180 mm thick is located in the capsule
 - 160 specimens are located at one capsule level
 - The tests were successfully performed

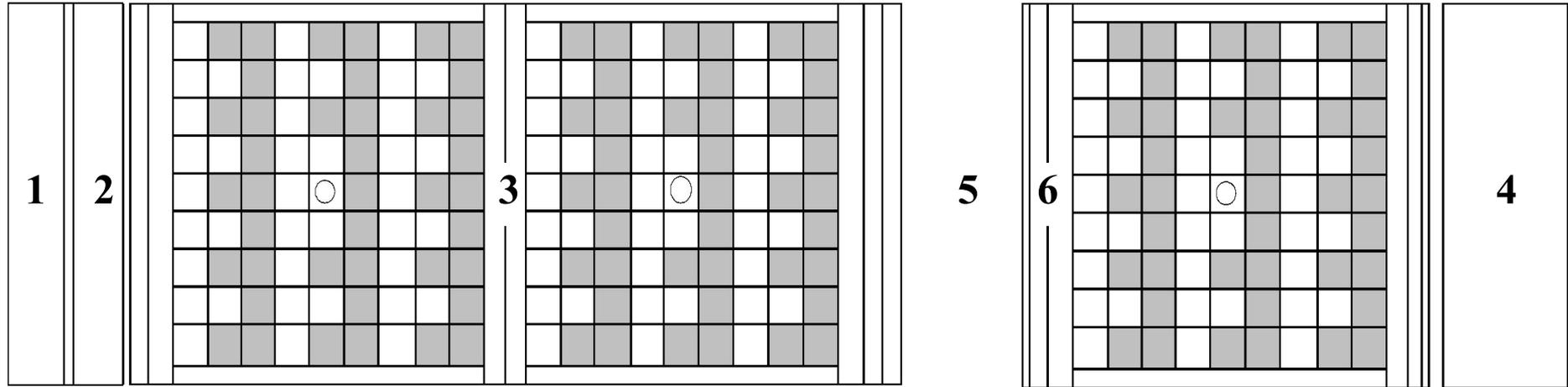
3.6.

Расположение образцов в ампуле новой конструкции



3.8.

Возможная схема загрузки стенда Possible loading of the facility



Три соотношения между радиационно и термически активированными процессами в металле.

Ослабление радиационного повреждения по толщине блока образцов, соответствующее ослаблению на толщине корпуса ВВЭР-1500.

Three relations between radiation and thermal activated processes in metal.
Attenuation of radiation damage over the thickness of the block of samples corresponding to attenuation over the thickness of the WWER-1500 vessel.

Перечень первоочередных работ Top-priority activities

- 1. Испытания образцов металла сварного шва по радиационному повреждению, соответствующему 8 - 16 годам эксплуатации корпуса ВВЭР-1000.
- 2. Моделирование эффекта экранирования корпуса образцами-свидетелями.
- 3. Облучение (1 год) металла опытного корпуса реактора ВВЭР-1500 при плотности потока нейтронов $(0,8 - 0,3) \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$ ($F = 1,5 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-2}$, 30-12 : 1).
- 4. Облучение (4 года) металла опытного корпуса реактора ВВЭР-1500 при плотности потока нейтронов $(2,7 - 1,1) \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$ ($F = 2,2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-2}$, 1 : 1).
- 5. Облучение (4 года) металла опытного корпуса реактора ВВЭР-1500 при плотности потока нейтронов $(0,2 - 0,1) \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$ ($F = 1,5 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-2}$, 8 - 4 : 1) с

изменённым соотношением потока нейтронов и гамма - квантов.

- 1. Test of welded joint metal samples based on the radiation damage corresponding to to 8 - 16 years the VVER-1000 operation.
- 2. Modelling of the vessel shielding effect by surveillance specimens.
- 3. Irradiation (1 year) of metal of the pilot VVER-1500 vessel at a neutron flux density of $(0.8 - 0.3) \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ($F = 1.5 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-2}$, 30-12 : 1).
- 4. Irradiation (4 years) of metal of the pilot VVER-1500 vessel at a neutron flux density of $(2.7 - 1.1) \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ($F = 2.2 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-2}$, 1 : 1).
- 5. Irradiation (4 years) of metal of the pilot VVER-1500 vessel at a neutron flux density of $(0.2 - 0.1) \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ($F = 1.5 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-2}$, 8 - 4 : 1) with the changed ratio of the neutron flux and gamma-quanta.

Заключение

Conclusion

С использованием стенда КОРПУС в 1999 – 2004 гг. показано:

1. Штатный основной металл и штатный металл сварного шва корпусов ВВЭР-1000 при ускоренном облучении имеет ресурс по радиационному охрупчиванию, превышающий назначенный в проекте реактора ВВЭР-1000.

2. На стенде может быть организовано опережающее (6:1, 4:1, 2:1) сопровождение эксплуатации головного реактора ВВЭР-1500 и получена представительная информация для обоснования продолжения эксплуатации корпусов реакторов ВВЭР-1000.

3. Системные исследования металла, используемые в корпусах реакторов ВВЭР-1000, ВВЭР-1500 и ВВЭР-640, и модификаций этого металла позволят определить предельный ресурс по радиационному охрупчиванию стали типа 15Х2НМФА, уточнить физические и материаловедческие модели процесса радиационного охрупчивания.

Для организации исследований необходимо подготовить и выполнить Программу «Предельный радиационный ресурс основного металла и металла сварного шва стали типа 15Х2НМФА, применяемой в проектах ВВЭР-640, ВВЭР-1000, ВВЭР-1500»

1. Under the accelerated irradiation the standard base metal and standard welded joint metal of the VVER-1000 vessels have radiation embrittlement resource exceeding the design one

2. The KORPUS facility can be used for the advanced operation of the VVER-1500 reactor as well as for obtaining of the representative data to justify the prolongation of the VVER-1000 vessel operation

3. Periodical examinations of metal used in the VVER-1000, VVER-1500 and VVER-640 vessels allow the determination of the limiting radiation embrittlement resource as well as specification of the physical and material science models of the radiation embrittlement process.

To perform the examination the Program “Limiting radiation resource of base metal and welded joint metal 15X2HMFA should be implemented in the VVER-640, VVER-1000 and VVER-1500 projects”.