



НИИАР

60 ЛЕТ  
НИИАР

# СБОРНИК ТРУДОВ

АО «ГНЦ НИИАР»

Выпуск 1, 2016

Димитровград  
2016

# **СБОРНИК ТРУДОВ**

**акционерного общества  
«Государственный научный центр —  
Научно-исследовательский институт  
атомных реакторов»**

**Сборник научных статей**

**Выпуск 1, 2016**

**Димитровград  
2016**

Сборник трудов акционерного общества «Государственный научный центр — Научно-исследовательский институт атомных реакторов» (сборник научных статей). — Димитровград: АО «ГНЦ НИИАР», 2016. Вып. 1. — 99 с.

Сборник трудов содержит научные статьи сотрудников института по основным направлениям деятельности АО «ГНЦ НИИАР», как-то: исследовательские ядерные реакторы; исследования твэлов и реакторных материалов; МОКС-топливо для ядерных реакторов на быстрых нейтронах; исследования и разработки элементов топливного цикла ядерной энергетики; трансурановые элементы, радионуклидные препараты и источники излучений; радиационная и экологическая безопасность, обращение с отработавшим ядерным топливом и радиоактивными отходами и др.

*Главный редактор:* В.В. Калыгин, доктор технических наук, профессор.

*Редакционная коллегия:* Валиков Ю.А., Головченко Ю.М., Ерин Е.А., Жемков И.Ю., Жителев В.А., Захаров А.В., Звир Е.А., Ижутов А.Л. (зам. председателя), Ильенко С.А., Калевич Е.С., Калыгин В.В. (председатель), Киверов С.А., Клочков Е.П., Крюков Ф.Н., Кузин М.А., Лизин А.А., Малков А.П., Неустроев В.С., Осипенко А.Г., Разживин С.Г., Романовский С.В., Ротманов К.В., Рыбин А.А., Старков В.А., Соболев А.М., Тарасов В.А., Топоров Ю.Г., Чертухина Н.В. (секретарь), Шамардин В.К., Шишин В.Ю., Шулимов В.Н.

*Рекомендован редакционно-издательским советом и утверждён научным советом акционерного общества «Государственный научный центр — Научно-исследовательский институт атомных реакторов»*

*Адрес редакции:*

433510, Российская Федерация, Ульяновская обл., г. Димитровград, Западное шоссе, д. 9

Тел.: (84-235) 6-51-46, тел./факс: (84-235) 3-58-59

E-mail: [bri@niiar.ru](mailto:bri@niiar.ru), website: [www.niiar.ru](http://www.niiar.ru)

Адрес электронной почты для связи с авторами статей: [bri@niiar.ru](mailto:bri@niiar.ru)

© Акционерное общество  
«Государственный научный центр —  
Научно-исследовательский институт  
атомных реакторов» (АО «ГНЦ НИИАР»), 2016

ISBN 978-5-94831-150-0

УДК 621.039.572  
ГРНТИ 58.33.37  
ББК 31.46:22.386:30.82

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НА РЕАКТОРНОЙ УСТАНОВКЕ ВК-50 С РАСШИРЕННОЙ АКТИВНОЙ ЗОНОЙ

© Д.П. Протопопов, Н.А. Святкина, Е.Г. Бреусова, Е.В. Синявина (e-mail: bri@niiar.ru)

*Поступила в редакцию 28.03.2016 г.*

*В статье содержатся результаты работы по совершенствованию топливного цикла, проведённой в соответствии с проектом по модернизации активной зоны реактора ВК-50 с целью улучшения его эксплуатационных характеристик и повышения надёжности реакторной установки. В результате была реализована загрузка расширенной шестирядной активной зоны, срок эксплуатации топливных сборок увеличен до шести лет за счёт дожигания их в шестом ряду активной зоны. Показано, что расширение активной зоны привело к снижению максимальных нагрузок на твэл, повышению устойчивости установки и экономии топлива, при этом свойства самозащищённости реактора сохранились. Экспериментальные исследования, проведённые на модернизированной зоне, подтвердили правильность расчётов, выполненных при обосновании безопасности загрузки шестирядной активной зоны реактора.*

**Ключевые слова:** модернизация; реакторная установка; расширенная активная зона; анализ эксплуатации; экспериментальные исследования; картограммы загрузки; нейтронно-физические характеристики; тепловыделение; устойчивость реактора; ядерная безопасность; программные средства.

# EXPERIMENTAL RESEARCH AT THE VK-50 REACTOR WITH UPGRADED CORE

© D.P. Protopopov, N.A. Svyatkina, E.G. Breusova, E.V. Sinyavina (e-mail: bri@niiar.ru)

*The paper presents the results of work aimed at the fuel cycle improvement carried out under the VK-50 core upgrading program to enhance its performance and increase its reliability. The work resulted in the upgraded 6-row core, prolonged operation of fuel assemblies due to its after-burning in the core 6<sup>th</sup> row. The core upgrading is shown to result in a decrease in the maximal load on a fuel rod, increase in the reactor stability and economy in fuel, the reactor self-protection remaining the same. The experimental research carried out at the upgraded core confirmed the calculations done to justify the upgraded 6-row core safety.*

**Key words:** upgrading, reactor, upgraded core, operational analysis, experimental research, core arrangement, neutronic characteristics, heat release, reactor stability, nuclear safety, software.

УДК 539.17.4: 621.039.532.5  
ГРНТИ 58.35.06:29.15.53  
ББК 31.46:22.38:24.122

## ЯДЕРНО-ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В БЕРИЛЛИИ ПОД ОБЛУЧЕНИЕМ И ИХ ВЛИЯНИЕ НА ФИЗИЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ РЕАКТОРОВ

© А.П. Малков, В.В. Пименов, В.В. Калыгин, А.В. Козыльков (e-mail: bri@niiar.ru)

*Поступила в редакцию 20.09.2016 г.*

*Накопление нейтронно-поглощающих нуклидов в бериллии, используемом в качестве замедлителя нейтронов, влечёт за собой изменение важнейших физических характеристик реактора: максимального запаса реактивности, эффективности органов системы управления и защиты, эффектов реактивности. Описываемая методика позволяет оперативно следить за накоплением лития-6 и гелия-3, а также водорода, трития и гелия-4. Учёт последнего нуклида особенно важен в связи с его большим влиянием на механическую стойкость бериллиевых блоков. Полученная информация используется при планировании загрузки активной зоны для кампаний реактора и проведении плановых технических работ по осмотру и замене бериллиевых блоков.*

**Ключевые слова:** бериллий; замедлитель и отражатель нейтронов; исследовательский ядерный реактор; ядерно-физические процессы; активная зона; реактивность; скорость ядерных реакций; концентрация продуктов ядерных реакций.

# Nuclear Physics Processes in Beryllium Under Irradiation and Their Effect on Research Reactor Physical and Technological Characteristics

© A.P. Malkov, V.V. Pimenov, V.V. Kalygin, A.V. Kozytkov (e-mail: bri@niiar.ru)

Neutron absorber accumulated in the solid moderator of the reactor entails changes in the most important physical characteristics, i.e. reactivity margin, control rods efficiency, reactivity effects. Therefore, a continuous monitoring of the beryllium blocks condition and their visual inspections are required. The described procedure allows the accumulation of lithium-6, tritium, helium-3 as well as hydrogen and helium-4 to be monitored. The accounting of the last nuclide is of primary importance since it effects greatly on the mechanical durability of the beryllium blocks. The information obtained is used to plan the reactor campaigns, load the core and perform scheduled maintenance operations.

**Key words:** beryllium; neutron reflector, nuclear research reactor; nuclear physics processes, core, reactivity, nuclear reaction rate, concentration of the nuclear reaction products.

УДК 621.039.532.21  
ГРНТИ 58.35.06  
ББК 31.4:85.15:22.386с

## ВЛИЯНИЕ ТЕРМИЧЕСКОГО ОТЖИГА НА ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ ГРАФИТА МАРКИ ГР-280, ОБЛУЧЁННОГО ДО ВЫСОКОГО ФЛЮЕНСА НЕЙТРОНОВ\*

© Е.П. Белан, Д.В. Харьков (e-mail: bri@niiar.ru)

*Поступила в редакцию 02.11.2016 г.*

*Статья посвящена изучению влияния нейтронного облучения и послереакторного термического отжига в диапазоне значений температуры от 600 до 1200 °С на теплопроводность графита марки ГР-280, облучённого при 450–650 °С до флюенса нейтронов  $(0,5–1,5) \cdot 10^{26} \text{ м}^{-2}$ . Коэффициент теплопроводности определяли методом лазерной вспышки. В результате проведённых исследований был установлен характер зависимости теплопроводности исследуемых образцов от температуры и длительности отжига. Показано, что коэффициент теплопроводности начинает восстанавливаться при температуре 800–900 °С; разность между коэффициентом теплопроводности образцов до и после отжига при температуре 1200 °С лежит в пределах 19–39 Вт/(м·К) и уменьшается с увеличением флюенса нейтронов и температуры облучения; коэффициент теплопроводности после отжига увеличивается в среднем в 2,3 раза независимо от параметров облучения.*

**Ключевые слова:** реакторный графит; нейтронное облучение; радиационные дефекты; термический отжиг; коэффициент теплопроводности.



# EFFECT OF THERMAL ANNEALING ON THE THERMAL CONDUCTIVITY OF GRADE GR-280 GRAPHITE IRRADIATED UP TO A HIGH NEUTRON FLUENCE

© E.P. Belan, D.V. Kharkov (e-mail: bri@niiar.ru)

Neutron absorber accumulated in the solid moderator of the reactor entails changes in the most important physical characteristics, i.e. reactivity margin, control rods efficiency, reactivity effects. Therefore, a continuous monitoring of the beryllium blocks condition and their visual inspections are required. The described procedure allows the accumulation of lithium-6, tritium, helium-3 as well as hydrogen and helium-4 to be monitored. The accounting of the last nuclide is of primary importance since it effects greatly on the mechanical durability of the beryllium blocks. The information obtained is used to plan the reactor campaigns, load the core and perform scheduled maintenance operations. The paper presents the study on the effect of neutron irradiation and post-irradiation thermal annealing (at 600–1200 °C) on the thermal conductivity of grade GR-280 graphite irradiated at 450–650 °C up to a neutron fluence of  $(0.5–1.5) \cdot 10^{26} \text{ m}^{-2}$ . The thermal conductivity coefficient was evaluated by the laser flash method. The study resulted in stating the nature of the thermal conductivity of samples in question vs. temperature and annealing duration. The thermal conductivity coefficient is shown to start recovering at 800–900 °C. At 1200 °C, the difference in the thermal conductivity coefficient of samples before and after annealing ranges from 19 to 39 W/(m·K) and it decreases as the irradiation temperature and neutron fluence become higher. After annealing, the relative change in the thermal conductivity coefficient makes up about 2.3 no matter the irradiation parameters are.

**Key words:** reactor-grade graphite; neutron irradiation; irradiation-induced defects; thermal annealing; thermal conductivity coefficient.

УДК 621.039.51  
ГРНТИ 58.33.37  
ББК 31.46с

## ИССЛЕДОВАНИЯ УСТОЙЧИВОСТИ РАСШИРЕННОЙ АКТИВНОЙ ЗОНЫ РЕАКТОРНОЙ УСТАНОВКИ ВК-50

© Д.П. Протопопов, Е.Г. Бреусова, Н.А. Святкина, Е.В. Синявина, С.В. Орешин (e-mail: bri@niiar.ru)

*Поступила в редакцию 03.10.2016 г.*

*Модернизация активной зоны реактора может привести к изменению его характеристик. Одной из важных характеристик водо-водяного корпусного кипящего реактора ВК-50 является его устойчивость. Анализ экспериментальных данных по флуктуациям плотности нейтронного потока модернизированной активной зоны реакторной установки ВК-50, непосредственно характеризующих её устойчивость, имеет важное практическое значение. Исследование устойчивости реактора по двум критериям: по максимальной мощности ТВС в центре активной зоны и по значению объёмного паросодержания — позволяет своевременно оценить состояние активной зоны и обеспечить безопасный режим работы реакторной установки.*

**Ключевые слова:** эксперимент; активная зона; модернизация; нейтронно-физическая устойчивость реактора; граница устойчивости; радиационная безопасность; коэффициент затухания автокорреляционной функции флуктуаций плотности нейтронного потока.

# EXAMINATION OF THE VK-50 REACTOR UPGRADED CORE STABILITY

© D.P. Protopopov, E.G. Breusova, N.A. Svyatkina, E.V. Sinyavina, S.V. Oreshin (e-mail: bri@niiar.ru)

*The upgrading of the reactor core may cause changes in its characteristics. One of the important characteristics of the VK-50 vessel-type boiling water-cooled reactor is its stability. The experimental data analysis based on fluctuations of neutron flux density of the VK-50 upgraded core is of a practical importance since these data characterize the reactor core stability. The examination of the reactor stability by two criteria, the maximal FA power in the core center and steam void fraction, allow for a timely assessment of the core state as well as for the provision of safe reactor operation.*

**Key words:** experiment, reactor core, upgrading, neutron-physical stability of the reactor, stability margin, radiation safety, attenuation factor of the auto-correlation function of the neutron flux density fluctuation.

УДК 620.19:621.039.743  
ГРНТИ 81.09.81  
ББК 31.4:30.8:34.2:34.66:31.4н

## ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ ЗАЩИТНОГО ПОКРЫТИЯ И ОБЛИЦОВКИ БАСЕЙНОВ ВЫДЕРЖКИ ЦЕНТРАЛЬНОГО ХРАНИЛИЩА ОТРАБОТАВШЕГО ЯДЕРНОГО ТОПЛИВА ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ РЕАКТОРОВ АО «ГНЦ НИИАР»

© В.В. Маклаков, В.С. Неустроев, Е.М. Табакин, И.Н. Кучкина,  
Е.И. Макаров, И.М. Смирнова, Г.В. Филякин, С.В. Дураков (e-mail: bri@niiar.ru)

*Поступила в редакцию 13.09.2016 г.*

*В статье представлены результаты исследований металлической облицовки и защитного антикоррозионного покрытия бассейнов выдержки центрального хранилища отработавшего ядерного топлива исследовательских реакторов АО «ГНЦ НИИАР», проведённых с целью оценки возможности дальнейшей эксплуатации хранилища. Результаты исследований подтвердили, что изолирующие свойства основного защитного материала стенок бассейнов — стали марки СтЗсп — сохранены; состояние сварных соединений удовлетворительное; защитное покрытие облицовки бассейнов своих антикоррозионных свойств не потеряло. Результаты оценки возможности дальнейшей эксплуатации хранилища позволяют с уверенностью заявлять, что защитное покрытие и облицовка бассейнов выдержки будут выполнять свои функции в течение длительного срока.*

**Ключевые слова:** отработавшее ядерное топливо; бассейн выдержки; коррозия стали; исследовательский реактор; хранилище отработавшего ядерного топлива; ядерная и радиационная безопасность; сварной шов; стресс-тесты.

# The condition of the protective jacket and lining of the storage pools at the RIAR research reactor spent fuel central storage facility

© V.V. Maklakov, V.S. Neustroev, E.M. Tabakin, I.N. Kuchkina, E.I. Makarov, I.M. Smirnova, G.V. Filyakin, S.V. Durakov (e-mail: bri@niiar.ru)

*The paper presents the investigation results for the metal lining of the storage pools at the RIAR research reactor spent fuel central storage facility. The investigation was done to assess the possibility of using the central storage facility in future. Studies confirm that the isolation properties of the Cm3cn steel, the primary protective material, are kept. The welds condition is satisfactory. Corrosion resistance of the storage pool protective jacket is kept. The results obtained allow us to say with certainty that even if the protective jacket is completely destroyed, the storage pool lining will serve long after.*

**Key words:** spent nuclear fuel, storage pool, steel corrosion, research reactor, spent nuclear fuel storage facility, nuclear and radiation safety, weld, stress-tests.

УДК 621.039.51  
ГРНТИ 29.15.53  
ББК 31.46:22.38

## РАСЧЁТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЛЯ НЕЙТРОНОВ В СТЕНДЕ «КОРПУС»

© А.И. Теллин, Д.К. Рязанов, В.В. Личадеев (e-mail: bri@niiar.ru)

*Поступила в редакцию 05.10.2016 г.*

*В данной работе обобщены результаты определения нейтронно-физических характеристик стенда «Корпус», разработанного в АО «ГНЦ НИИАР» и размещённого на реакторе РБТ-6 для облучения представительного массива образцов конструкционных материалов в регулируемых и контролируемых условиях, проведено сравнение данных эксперимента и расчёта, рассмотрены вопросы применения полученных результатов для обеспечения нейтронно-дозиметрического сопровождения облучения образцов.*

**Ключевые слова:** стенд «Корпус»; спектр нейтронов; поток нейтронов; плотность потока нейтронов; повреждающая доза; флюенс нейтронов; нейтронно-активационный детектор; скорость ядерной реакции; сечение реакции.

UDC 621.039.51  
SRSTI 29.15.53  
LBC 31.46:22.38

## Experimental and Calculation Study of the Neutron Field Characteristics in the “Korpus” Facility

© A.I. Tellin, D.K. Ryazanov, V.V. Lichadeev (e-mail: bri@niiar.ru)

*Received on 05.10.2016*

*The paper summarizes the results of research to determine neutron-physical characteristics of the “Korpus” facility located at the RBT-6 reactor. The facility was developed in JSC “SSC RIAR” to irradiate representative set of the structural materials samples under adjusted and controlled conditions. Experimental and calculation data are compared. Issues are considered related to application of the obtained results to provide neutron-dosimetric support for the structural materials samples irradiation.*

**Key words:** Korpus facility, neutron spectrum, neutron flux, neutron flux density, damage dose, neutron fluence, neutron activation detector, nuclear reaction rate, reaction cross-section.

# СОДЕРЖАНИЕ

Экспериментальные исследования на реакторной установке ВК-50 с расширенной активной зоной. <i>Д.П. Протопопов, Н.А. Святкина, Е.Г. Бреусова, Е.В. Синявина</i> .....	3
Ядерно-физические процессы в бериллии под облучением и их влияние на физические и технологические характеристики исследовательских реакторов. <i>А.П. Малков, В.В. Пименов, В.В. Калыгин, А.В. Козыльков</i> .....	13
Влияние термического отжига на теплопроводность графита марки ГР-280, облучённого до высокого флюенса нейтронов. <i>Е.П. Белан, Д.В. Харьков</i> .....	26
Исследования устойчивости расширенной активной зоны реакторной установки ВК-50. <i>Д.П. Протопопов, Е.Г. Бреусова, Н.А. Святкина, Е.В. Синявина, С.В. Орешин</i> .....	32
Оценка состояния защитного покрытия и облицовки бассейнов выдержки центрального хранилища отработавшего ядерного топлива исследовательских реакторов АО «ГНЦ НИИАР». <i>В.В. Маклаков, В.С. Неустроев, Е.М. Табакин, И.Н. Кучкина, Е.И. Макаров, И.М. Смирнова, Г.В. Филякин, С.В. Дураков</i> .....	40
Расчётно-экспериментальные исследования характеристик поля нейтронов в стенде «Корпус». <i>А.И. Теллин, Д.К. Рязанов, В.В. Личадеев</i> .....	52
Приложения .....	74
Список сокращений .....	95



Научное издание

Сборник трудов  
акционерного общества «Государственный научный центр —  
Научно-исследовательский институт атомных реакторов»

Сборник научных статей  
Выпуск 1, 2016

Редактор Н.В. Чертухина  
Компьютерная вёрстка Л.Н. Никишиной  
Дизайн издания В.М. Недашковского

Подписано в печать 22.12.2016. Формат 60x84/8.  
Усл. печ. л. 11,39. Уч.-изд. л. ~ 8,1. Ризография.  
Гарнитура «Times New Roman», «Myriad Pro Cond». Тираж 70 экз. Заказ № 1107.

Оригинал-макет подготовлен специалистами управления коммуникаций АО «ГНЦ НИИАР»  
433510, Российская Федерация, Ульяновская область, г. Димитровград, Западное шоссе, д. 9

Отпечатано в акционерном обществе «Государственный научный центр —  
Научно-исследовательский институт атомных реакторов»  
433510, Российская Федерация, Ульяновская область, г. Димитровград, Западное шоссе, д. 9

ISBN 978-5-94831-149-4



9 785948 311494