

## **КЛАССИФИКАЦИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ ПО ВЛИЯНИЮ НА ЯДЕРНУЮ БЕЗОПАСНОСТЬ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ РЕАКТОРОВ**

Малков А.П. (ОАО «ГНЦ РФ – НИИАР»)

Экспериментальные устройства (ЭУ) для размещения облучаемых материалов – неперенная принадлежность любого исследовательского реактора (ИР). За более чем 60-летний период эксплуатации ИР создано множество экспериментальных методик и облучательных устройств, позволяющих обеспечивать требуемые условия испытаний, а также накоплен опыт проведения различных экспериментов [1–4]. В то же время, тематика проводимых исследований постоянно расширяется. Развитие ядерной и, в перспективе, термоядерной энергетики, проблема обеспечения и обоснования безопасности ядерных установок при увеличивающемся сроке эксплуатации, требования к лицензированию реакторных материалов, старение ядерно-опасных объектов обуславливают необходимость постановки новых классов экспериментов, разработки новых ЭУ, реализации заданных, в том числе динамических режимов испытаний. Принципиальным отличием ИР от других типов ядерных реакторов является то, что ЭУ и режимы проводимых испытаний могут оказывать значительное влияние на основные нейтронно-физические характеристики ИР. При внедрении новых типов ЭУ в процессе эксплуатации реактора его проектные характеристики могут изменяться. В этом случае, в соответствии с требованиями нормативных документов по безопасности [5, 6], необходимо детальное обоснование безопасности реактора как для режима нормальной эксплуатации, так и для постулируемых аварийных ситуаций.

К основным этапам обеспечения безопасности ИР следует отнести:

- заблаговременное установление степени влияния нового ЭУ на нейтронно-физические характеристики реактора;
- сопоставление полученных результатов по изменению нейтронно-физических характеристик активной зоны под воздействием ЭУ с проектными (допустимыми) пределами;
- выбор организационно-технических мер (в рамках применяемых эксплуатационных процедур) обеспечения ядерной безопасности при проведении эксперимента;
- определение, в достаточно редких случаях, необходимых действий по изменению систем (элементов) реактора и/или режимов его эксплуатации, когда внедряемое ЭУ нового типа приводит к изменению проектных характеристик реактора.

Степень воздействия различных ЭУ на характеристики реактора, важные для ядерной безопасности, может существенно отличаться. Например, изменение компоновки центральной нейтронной ловушки одного из наиболее мощных ИР мира СМ [2, 4] вследствие ее значительного влияния на физические характеристики активной зоны приведет к необходимости выполнения большого комплекса работ по обоснованию безопасности, предписанного нормативными документами. Облучение же в каналах отражателя реактора СМ различных материалов приводит к практически одинаковым воздействиям на реактивность, распределение энерговыделения в активной зоне, эффективность органов системы управления и защиты (СУЗ) [7]. Поэтому нет необходимости каждый раз проводить детальный анализ безопасности с различными вариантами конструкции таких устройств. Достаточно выполнить его для предельных случаев, а результаты привести в отчете по обоснованию безопасности (ООб) реактора. Точно так же и для ИР других типов степень влияния различных ЭУ на характеристики, важные для безопасности, отличается.

Таким образом, целесообразно иметь классификацию ЭУ по их влиянию на ядерную безопасность, чтобы уже на этапе планирования облучения отнести ЭУ к тому или иному классу. Изначальное установление класса устройства позволит определить и оптимизировать этапы работы по обеспечению и обоснованию безопасности реактора при проведении испытаний.

**Влияние экспериментальных устройств на основные физические характеристики, определяющие ядерную безопасность исследовательского реактора**

К важнейшим проектным нейтронно-физическим характеристикам, определяющим ядерную безопасность ИР, относятся характеристики, связанные с коэффициентом размножения нейтронов (реактивностные параметры) – запас реактивности, эффективность органов СУЗ, знак и величина обратных связей по реактивности, подкритичность реактора с введенными органами СУЗ, эффекты реактивности при перегрузке активной зоны и т.д. Не менее важные характеристики – коэффициенты неравномерности энерговыделения в активной зоне. Они определяют при данной мощности реактора температуру топливной композиции и оболочки твэлов, а также максимальную плотность теплового потока с оболочки твэлов и, соответственно, запас до кризиса теплообмена в возможных (нормальных и аварийных) условиях их охлаждения. Именно от этих параметров (их отличия от допустимых значений) зависит работоспособность твэлов (сохранение герметичности оболочки и неизменность формы) любых ядерных реакторов, в том числе и исследовательских.

При загрузке активной зоны ядерного реактора необходимо обеспечить гарантированный запас до критичности (подкритичность). Поэтому следует знать, какое воздействие на реактивность активной зоны оказывает перегружаемый элемент, в том числе и элементы ЭУ. Реактивность, вносимая ЭУ, относится к паспортным характеристикам ИР. Ее значение используют, например, в качестве исходных данных при анализе аварийных ситуаций на ЭУ. Очевидно, что чем больше эффект реактивности при аварийном выбросе облучательного устройства (ОУ), тем больше, при прочих равных условиях, «выбег» мощности реактора, от величины которого, в свою очередь, зависит степень возможной разгерметизации твэлов. Поэтому при подготовке эксперимента необходимо определить, какую реактивность вносит ЭУ как в режиме нормальной эксплуатации, так и при постулируемых аварийных ситуациях. К перечню аварийных ситуаций, как правило, относят: несанкционированное перемещение ОУ или его элементов; изменение агрегатного состояния теплоносителя в экспериментальном канале вследствие перекрытия (полного или частичного) проходного сечения канала, разгерметизации канала или прекращения циркуляции теплоносителя; заброс реакторной воды в газовые полости ЭУ и т.д. Все эти процессы сопровождаются изменением реактивности, и это изменение необходимо установить на этапе планирования эксперимента. В случае, если эффекты реактивности выше, чем использованные в ООБ, требуется провести уточняющий анализ безопасности и, при необходимости, внести изменения в конструкцию устройства или системы реактора.

Исходные данные, необходимые для расчетного анализа последствий любых постулируемых аварийных ситуаций, – величина и скорость ввода отрицательной реактивности при аварийном останове реактора. Эти параметры определяют временной график изменения мощности реактора в ходе развития инцидента. Таким образом, для корректного расчета последствий любых аварийных ситуаций необходимо знать эффективность рабочих органов СУЗ. ЭУ оказывают заметное влияние на эффективность органов СУЗ ИР [7–9]. Требования правил ядерной безопасности ИР [6] ограничивают шаг ( $\leq 0,3\beta_{эф}$ ) и скорость ввода положительной реактивности ( $\leq 0,07\beta_{эф}/с$ ) при перемещении органов СУЗ. Поэтому в документах, обосновывающих безопасность проведения эксперимента, должно быть показано, как загружаемое ЭУ влияет на эффективность органов СУЗ, и доказано, что его нахождение в реакторе не приведет к нарушениям требований правил ядерной безопасности по указанным параметрам.

На протекание аварийных ситуаций заметное влияние оказывают также обратные связи по реактивности: знак и величина мощностного, температурного, плотностного эффектов реактивности. ЭУ могут оказывать влияние и на эти характеристики. Например, температурный коэффициент реактивности для реактора СМ с блочной компоновкой нейтронной ловушки ( $-1,83 \cdot 10^{-2} \beta_{эф}/^{\circ}C$ ) почти в два раза превышает аналогичное значение температурного коэффициента реактивности для реактора с центральным петлевым каналом ( $-1,09 \cdot 10^{-2} \beta_{эф}/^{\circ}C$ ) [10].

ЭУ в активной зоне и нейтронных ловушках заметно влияют на распределение энерговыделения в реакторе [9–13].

По масштабу воздействия ЭУ на физические характеристики ИР можно провести их классификацию [7]. Наличие такой классификации позволит разделить ЭУ на те устройства, безопасность работы реактора с которыми определена проектными характеристиками установки, доказана практикой, обоснована расчетными исследованиями (для аварийных ситуаций), и те устройства, применение которых потребует реализации дополнительных мер организационно-технического характера, обеспечивающих безопасность реактора в процессе проведения испытаний. Для первой группы ЭУ при планировании испытаний потребуется лишь уточняющий анализ безопасности, учитывающий текущее состояние реактора и загрузку его экспериментальных объемов. Для другой группы (новые типы ЭУ) потребуется выполнение достаточно большого объема предварительных работ по подготовке реактора к проведению экспериментов, включающих: техническое дооснащение реактора, определение допустимых режимов его эксплуатации, анализ безопасности для постулируемых аварийных ситуаций, получение разрешения государственных надзорных органов на эксплуатацию реактора с таким ЭУ.

Таким образом, предлагаемая ниже классификация определяет объем и характер подготовительных работ для обеспечения и обоснования ядерной безопасности ИР при проведении испытаний.

### **Классификация экспериментальных устройств исследовательских реакторов**

ЭУ ИР предлагается разделить на четыре класса, в разной степени влияющих на ядерную безопасность.

#### **1-й класс – ЭУ, приводящие к изменению проектных характеристик ИР**

К первому классу могут быть отнесены: нейтронная ловушка высокопоточного ИР [7, 10] и устройства, размещаемые в активной зоне реактора, если они изменяют предельные значения проектных характеристик по эффективности органов СУЗ и неравномерности энерговыделения. Например, при планируемой модернизации активной зоны реактора СМ [14] предполагается установить два петлевых канала в ячейки, предназначенные в настоящее время для размещения тепловыделяющей сборки (ТВС). Эти каналы относятся к первому классу по предлагаемой классификации, поскольку их воздействие на размножающие свойства активной зоны достаточно велико и для компенсации потери реактивности и обеспечения приемлемой продолжительности кампании реактора потребовалось перейти на новый твэл с повышенной на 20% загрузкой  $^{235}\text{U}$ . Профиль энерговыделения в новой компоновке активной зоны будет другим, по сравнению с имеющимся, как и максимальные нагрузки на твэлах в характерных ячейках активной зоны, что потребует, по-видимому, изменения схемы гидравлического профилирования расхода теплоносителя или снижения мощности реактора. К первому классу относятся также петлевые установки и петлевые каналы новых типов при их размещении в реакторе МИР [4].

#### **2-й класс – ЭУ, требующие выполнения специальных организационно-технических мероприятий для сохранения эффективности органов СУЗ и распределения энерговыделения в активной зоне в проектных пределах**

К устройствам 2-го класса относятся, например, устройства внутри ТВС, размещаемые в активной зоне реактора СМ [7]. К этому же классу относятся ЭУ реактора МИР, предназначенные для испытания твэлов различных реакторов в аварийных и переходных режимах [9, 12, 13]. В процессе проведения динамических экспериментов, связанных с быстрым изменением мощности экспериментальной ТВС и реактора в целом, а также с изменением агрегатного состояния теплоносителя в экспериментальном канале, требуются специальные меры обеспечения безопасности.

#### **3-й класс – ЭУ, оказывающие влияние на реактивность, эффективность органов СУЗ и распределение энерговыделения в пределах проектных значений**

К таким устройствам относятся типовые ЭУ, предусмотренные проектом реактора и размещаемые в активной зоне реактора для проведения стационарных ресурсных ис-

питаний при постоянных условиях облучения, а также в ближних к активной зоне каналах отражателя [1–4].

**4-й класс – ЭУ, не оказывающие влияния на реактивность, эффективность органов СУЗ и неравномерность распределения энерговыделения**

К этому классу относятся ЭУ в дальних по отношению к активной зоне каналах отражателей ИР. Они не оказывают (в пределах погрешности расчета и эксперимента) влияния на характеристики реактора, важные для ядерной безопасности. Аварийные ситуации с устройствами этого класса (ухудшение теплоотвода, разрыв канала, несанкционированное перемещение и т.д.) могут привести к радиационным последствиям, но не повлияют на ядерную безопасность активной зоны.

Следует подчеркнуть, что предлагаемая классификация ЭУ относится к этапу подготовки испытаний. Причем, отнесение ЭУ при планировании испытаний к первым двум классам может потребовать до начала экспериментов технической доработки реактора (например изменения исполнительных механизмов органов СУЗ, схемы гидравлического профилирования расхода теплоносителя, логики схем управления оборудованием реактора и т.д.) и/или изменения режимов работы реактора (например снижения мощности, применения специального алгоритма перегрузки ТВС, другой последовательности перемещения органов СУЗ и т.д.). Эти превентивные меры организационно-технического характера должны обеспечить безопасность ИР при использовании ЭУ новых типов.

Основные процедуры, необходимые для обеспечения и обоснования безопасности реактора СМ при подготовке и проведении испытаний, представлены в табл. 1.

**Таблица 1**

**Требуемые процедуры при подготовке эксперимента с ЭУ различного класса**

<b>Процедура</b>	<b>1-й класс</b>	<b>2-й класс</b>	<b>3-й класс</b>
Определение коэффициентов неравномерности энерговыделения в активной зоне и пределов изменения эффективности органов СУЗ	+	+	-
Определение температурного и мощностного коэффициентов реактивности	+	±	-
Расчет параметров гидравлического профилирования расхода теплоносителя по характерным ячейкам активной зоны	±	±	-
Выбор алгоритма перегрузок ТВС, обеспечивающего допустимые эффективность органов СУЗ и профиль энерговыделения	+	+	-
Определение эффектов реактивности при перегрузке ЭУ и в процессе испытаний с учетом постулируемых аварийных ситуаций	+	+	+
Определение допустимых режимов работы реактора (мощность, скорость ее изменения, алгоритм перемещения органов СУЗ и т.д.)	+	+	+
Уточняющий анализ постулируемых аварийных ситуаций с внесением результатов в документацию, обосновывающую безопасность	+	+	+
Изменение эксплуатационной документации и обучение персонала	+	±	-
Подготовка требуемых документов, получение разрешения на эксплуатацию и оформление паспорта ИР с данным ЭУ	+	+	-

Примечание. ± – необходимость выполнения процедур определяется по результатам расчетных оценок.

### **Алгоритм определения условий обеспечения безопасности исследовательских реакторов при подготовке и проведении экспериментов**

Одним из основных параметров, определяющих степень влияния ЭУ на характеристики, важные для безопасности, является место его размещения в реакторе. Реактивность, вносимая одним и тем же устройством, может меняться не только по величине, но и по знаку, в зависимости от его расположения. Например, одна и та же мишень с веществом, слабо поглощающим нейтроны, вносит при загрузке ее в наружный ряд нейтронной ловушки реактора СМ положительную реактивность до  $0,03 \beta_{эф}$ , в ближних каналах отражателя и в активной зоне – отрицательную (до  $0,06 \beta_{эф}$ ) и не меняет реактивность при загрузке во внутренние ряды центрального блока трансурановых мишеней (ЦБТМ) и дальние каналы отражателя.

Следующим параметром для установления класса ЭУ целесообразно выбрать режим испытаний – стационарный или динамический. Большинство материалов облучают в ИР при стационарных режимах. Однако периодически планируют и проводят эксперименты, требующие изменения условий испытаний в процессе работы реактора (импульсные, циклические, маневренные, моделирующие аварийные ситуации со снижением расхода или потерей теплоносителя и т.д.). Динамические испытания более сложны по сравнению со стационарными испытаниями как по конструкции ЭУ, так и по обеспечению и обоснованию безопасности. При динамических испытаниях даже небольшое по абсолютной величине изменение реактивности, вызванное, например перемещением элементов устройства для циклических (по условиям облучения) испытаний материалов, может привести к отключению системы автоматического регулирования реактора в случае быстрого ввода реактивности, сопоставимой по величине с эффективностью рабочих органов автоматического регулятора. Это, в свою очередь, потребует вмешательства в управление реактором оператора, действия которого в условиях быстро протекающих процессов могут оказаться неадекватными. Поэтому устройства для динамических испытаний в предлагаемой классификации занимают позиции, как минимум, на ступень выше по сравнению с устройствами для стационарных испытаний, размещаемыми в тех же ячейках реактора.

Очередным параметром для установления класса ЭУ выбраны нейтронно-физические характеристики облучаемых материалов, которые позволяют определять их как поглотители нейтронов, делящиеся вещества и прочие. В совокупности с местом размещения ОУ и планируемым режимом испытаний этот параметр также позволяет заранее установить класс ЭУ.

При планировании испытаний на ИР с новыми типами ЭУ целесообразно пользоваться схемой, представленной на рис. 1, которая определяет алгоритм подготовительных работ по обеспечению и обоснованию ядерной безопасности реактора при работе с тем или иным ЭУ.

#### **Применение алгоритма**

Примером применения алгоритма определения и выполнения условий обеспечения ядерной безопасности реактора СМ с новыми типами ЭУ стал комплекс работ, проведенных при изменении компоновки нейтронной ловушки реактора СМ в 2002 г. Для повышения плотности потока тепловых нейтронов при сохранении количества облучаемых мишеней центральный бериллиевый блок в центральной замедляющей полости (ЦЗП) заменили сепараторной конструкцией из 27 циркониевых труб  $\varnothing 14 \times 0,5$  мм с водой в межтрубном пространстве [10]. Результаты выполненных расчетов показали, что плотность потока тепловых нейтронов при замене бериллия на воду в центральной полости нейтронной ловушки должна возрасти более чем на 30%.

Изменение состава замедлителя нейтронов в нейтронной ловушке требует для обеспечения и обоснования безопасности реактора выполнения комплекса работ, предусмотренных для ввода в эксплуатацию ЭУ 1-го класса. В соответствии с этим они были спланированы и выполнены.

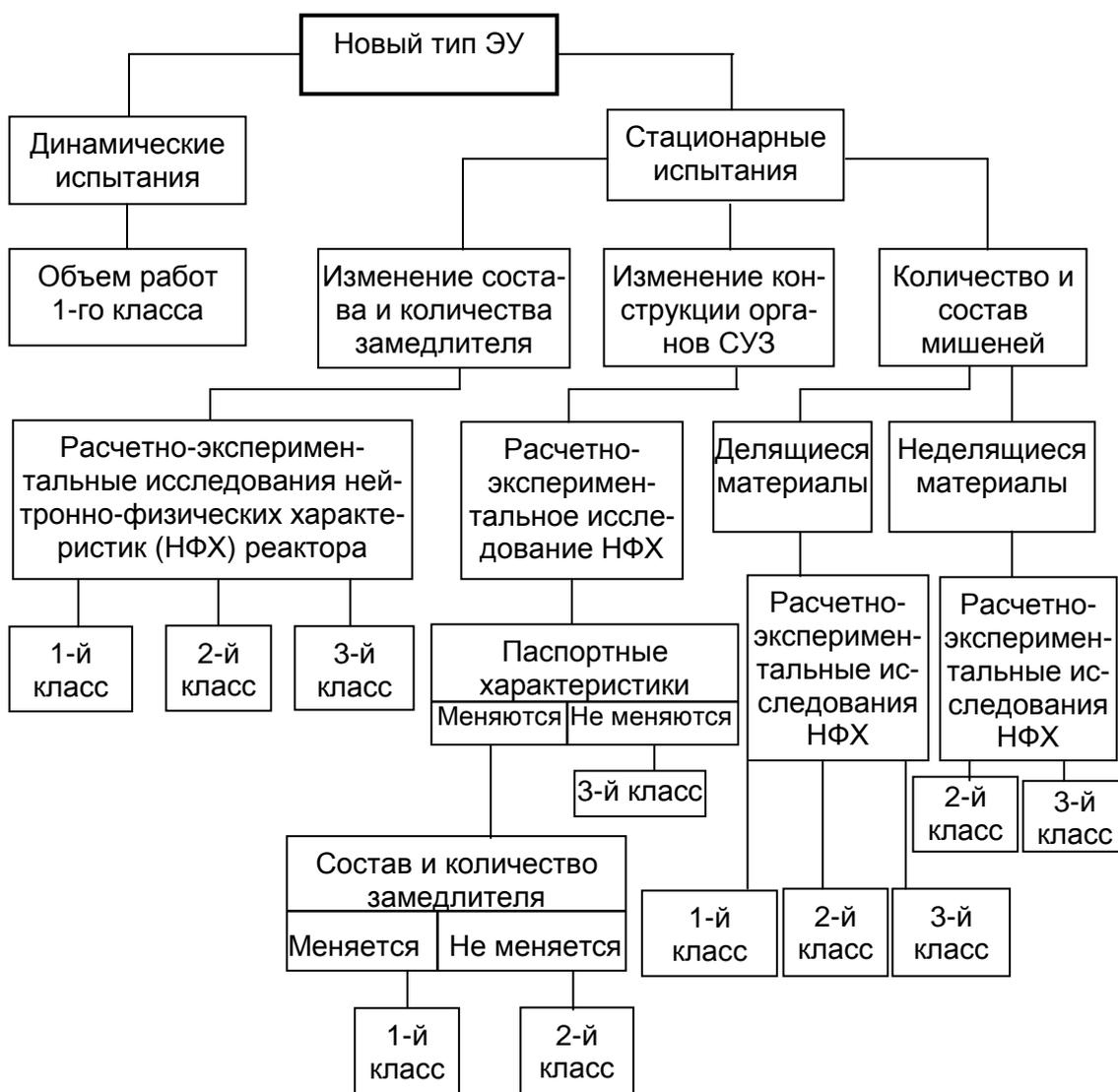


Рис. 1. Схема установления класса ЭУ при планировании испытаний

Результаты проведенных экспериментальных исследований нейтронно-физических характеристик активной зоны реактора СМ с новой компоновкой нейтронной ловушки показали, что при замене части бериллия на воду в центральной полости уменьшился запас реактивности, снизилась эффективность органов СУЗ в нейтронной ловушке, изменились коэффициенты неравномерности энерговыделения в характерных ячейках и в целом по активной зоне [10]. Неравномерность энерговыделения по ТВС в активной зоне в направлении от центра реактора к периферии несколько снизилась. В меньшей степени изменился температурный эффект реактивности, в пределах погрешности измерений и расчетов сохранилось неизменным значение мощностного коэффициента реактивности. Основные результаты исследований представлены в табл. 2. и на рис.2.

Использование предложенного алгоритма определения условий безопасности реактора при внедрении нового ЭУ и разработке программ исследований позволило более чем в три раза сократить временные затраты на получение качественных результатов, необходимых для обеспечения и обоснования безопасности реактора СМ с новой компоновкой нейтронной ловушки, по сравнению с аналогичными затратами во время проведения исследований в 1992 г. при пуске реактора СМ после реконструкции.

Таблица 2

**Некоторые нейтронно-физические характеристики реактора СМ до и после замены центрального бериллиевого блока в нейтронной ловушке на сепараторную конструкцию с водой в межтрубном пространстве**

Параметр	Бериллиевый блок в ЦЗП	Сепараторная конструкция в ЦЗП
Изменение запаса реактивности, $\beta_{эф}$	0	-1,3
Температурный эффект реактивности при изменении средней температуры теплоносителя от 16 °С до 70 °С, $\beta_{эф}$	-0,65	-0,56
Знак и величина мощностного коэффициента реактивности при рабочих параметрах активной зоны, $(\Delta K/K)/\%N_{ном}$	$-(3\pm 1)\cdot 10^{-5}$	$-(3\pm 1)\cdot 10^{-5}$
Коэффициент неравномерности распределения энерговыделения:		
– по высоте активной зоны;	1,25	1,25
– по сечению активной зоны;	2,16	1,88
– по сечению ТВС, граничащей с ЦЗП;	2,06	2,27
– по объему активной зоны	5,60	5,33
Эффективность органа СУЗ:		
– активной зоны;	0,5 – 1,5	0,4 – 1,3
– центрального компенсирующего органа;	3,0 – 4,5	2,6 – 3,6
– компенсирующего органа;	1,3 – 3,5	1,3 – 3,3
– АР	0,01 – 0,4	0,01 – 0,4

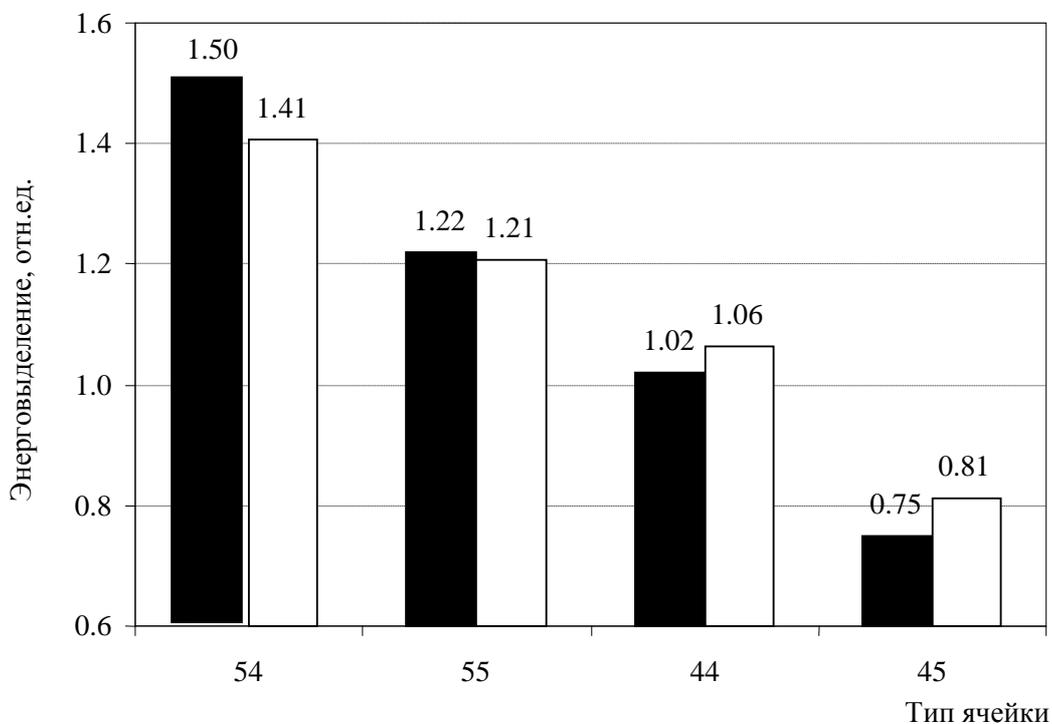


Рис. 2. Среднее энерговыделение в типовых ячейках активной зоны реактора СМ с бериллиевым блоком (■) и сепаратором (□) в ЦЗП

### Заключение

На основании результатов проведенных исследований нейтронно-физических характеристик ИР с различными типами ЭУ предложена классификация ЭУ по влиянию на характеристики реактора, важные для ядерной безопасности. Ее наличие позволяет установить этапы работы, необходимые и достаточные для обеспечения и обоснования ядерной безопасности реактора при проведении испытаний, оптимизировать и минимизировать объем подготовительных работ.

### Список литературы

1. Бать Г.А., Коченов А.С., Кабанов Л.П. Исследовательские ядерные реакторы: Учеб. пособие для вузов. - 2-е изд. - М.: Энергоатомиздат, 1985.
2. Цыканов В.А., Самсонов Б.В. Техника облучения материалов в реакторах с высоким нейтронным потоком.- М.: Атомиздат, 1973.
3. Гончаров В.В. Исследовательские реакторы. Создание и развитие. М.: Наука, 1986.
4. Исследовательские реакторы НИИАР и их экспериментальные возможности. Под. ред. В.А. Цыканова.- Димитровград: НИИАР, 1991.
5. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии. Общие положения обеспечения безопасности исследовательских ядерных установок. НП-033-01.- М.: НТЦ ЯРБ, 2001.
6. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии. Правила ядерной безопасности исследовательских реакторов (ПБЯ ИР-04). НП-009-04.- М.: НТЦ ЯРБ, 2004.
7. Малков А.П. Классификация экспериментальных устройств по влиянию на ядерную безопасность реактора СМ. Сборник докладов XII ежегодной международной научно-технической конференции ядерного общества России «Исследовательские реакторы: Наука и высокие технологии». Том 2, Часть 3.- Димитровград: ФГУП ГНЦ РФ НИИАР, 2002 г., с. 91–106.
8. Малков А.П., Краснов Ю.А., Калыгин В.В., Гремячкин В.А. Влияние различных эксплуатационных факторов на эффективность органов СУЗ реактора СМ. - Сборник трудов.- Димитровград: ГНЦ РФ НИИАР, 1998 г., Вып.4., с.142–155.
9. Грачев А.Ф., Калыгин В.В., Малков А.П., и др. Изучение возможности проведения в реакторе МИР экспериментов со скачкообразным увеличением мощности твэлов. – Вопросы атомной науки и техники. Серия «Ядерная техника и технология», 1993, вып.1, с. 41–49.
10. Краснов Ю.А., Малков А.П., Рязанов Д.К. и др. Расчетно-экспериментальные исследования нейтронно-физических характеристик реактора СМ с различными вариантами компоновки нейтронной ловушки. - Атомная энергия, 2009, т. 107, вып. 2, с. 63–69.
11. Краснов Ю.А., Малков А.П., Пименов В.В., Пименова О.В. Расчетно-экспериментальные исследования распределения энерговыделения в активных зонах реакторов СМ и РБТ. Сборник трудов. - Димитровград: ГНЦ РФ НИИАР, 2002. Вып.3, с. 52–63.
12. Алексеев А.В., Калыгин В.В., Малков А.П. и др. Формирование нейтронно-физических условий для проведения в реакторе МИР испытаний твэлов ВВЭР в нестационарных режимах с увеличением мощности. - Атомная энергия, 2008, т. 104, вып. 5, с. 279–284.
13. Калыгин В.В., Малков А.П. Особенности обеспечения ядерной безопасности реактора МИР при проведении экспериментов по моделированию аварийных и переходных режимов водоохлаждаемых реакторов. - Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика. № 4, 2007, с. 40–46.
14. Цыканов В.А., Клинов А.В., Старков В.А. и др. Модернизация активной зоны реактора СМ для решения задач материаловедения. - Атомная энергия, 2003 г., т. 93, № 3, с.167.

**Комментарии к статье А.П. Малкова «Классификация экспериментальных устройств по влиянию на ядерную безопасность исследовательских реакторов»**

В статье рассматривается методика подготовки обоснования безопасности при проведении экспериментов на ИР. Наличие методик организации таких работ на подготовительном этапе следует рассматривать как одну из составляющих культуры безопасности в эксплуатирующих организациях. Сами же методики заслуживают серьезного внимания и обсуждения в силу того, что ЭУ могут оказывать значительное влияние на характеристики реактора (и хорошей иллюстрацией этого служат конкретные примеры, представленные в данной статье). Это влияние определяет требование к полноте анализа безопасности и исключает возможность того, что на самых ранних этапах «вместе с водой может быть выплеснут и ребенок», то есть при подготовке обоснования безопасности не должен быть упущен эффект, который может повлиять на безопасность реактора как при штатном проведении экспериментов, так и в случае возникновения аварийной ситуации.

В качестве попытки начать дискуссию по такой важной теме, как безопасное проведение экспериментов на исследовательских ядерных установках, предлагается несколько комментариев к публикуемой статье.

1. Представленная методика предусматривает дифференциацию ЭУ на основании результатов нейтронно-физических расчетов. При дифференциальном подходе обычно принимается, что дифференциация не приводит к отказу от выполнения полного комплекса обоснований, а определяет объем проводимых работ. В данной методике предлагается не рассчитывать коэффициенты неравномерности энерговыделения в активной зоне и пределы изменения эффективности органов СУЗ для ЭУ 3-го класса (табл. 1). С другой стороны, ранее установлено, что влияние ЭУ 3-го класса на неравномерность энерговыделения и эффективность органов СУЗ таково, что эти параметры остаются в рамках проектных значений. Поскольку сложно априори определить величину влияния ЭУ на указанные параметры, требуется проведение расчетов, а в необходимых случаях – анализ экспериментальных данных. Кроме того, наличие оценки влияния ЭУ на указанные параметры является требованием НП-033-01, и расчеты должны проводиться с использованием аттестованных программных средств.

2. Без привязки к конкретной конструкции ЭУ следует отметить, что неделящиеся материалы также могут оказывать существенное влияние на ядерную безопасность. Во-первых, извлечение сильных поглотителей может давать большой положительный эффект реактивности, а во-вторых, поглотители могут сильно влиять на распределение энерговыделения в активной зоне.

3. Использование только нейтронно-физических расчетов может оказаться недостаточным для оценки влияния ЭУ на безопасность. Например, особенности конструкции и эксплуатации ЭУ (диаметр, длина, способ установки, температуры и т.д.) могут потребовать изменения проектной документации и соответствующего обоснования безопасности.

В статье затронута очень важная тема обеспечения безопасности проведения экспериментов на ИР. Было бы полезно, если бы она послужила началом обмена мнениями по этому вопросу.

Д.Н. Поляков

## **РЕФЕРАТЫ СТАТЕЙ**

### **УДК 621.039**

Гордон Б.Г. **О совершенствовании лицензирования видов деятельности по использованию атомной энергии.** – Ядерная и радиационная безопасность, 2010, № 3(57), с. 3–9.

Совершенствование лицензирования видов деятельности при использовании атомной энергии – важная и актуальная задача. В статье рассмотрены различные подходы к ее решению. По этому поводу существуют разные мнения, одно из которых представлено в данной статье.

Позиция автора базируется на предложенной классификации радиационных объектов по свойству потенциальной опасности. В частности, объекты использования атомной энергии подразделены на 10 классов. Эта классификация публикуется для обсуждения и последующего использования при дифференцированном подходе к совершенствованию лицензирования. Рис. 1. Табл. 1. Библ. 14.

*Ключевые слова:* радиационный объект, лицензирование, классификация, безопасность, атомная энергия, продукты деления, ядерные материалы, радионуклидные источники.

B.G. Gordon. **Concerning enhancement of licensing for the types of activities related to atomic energy use.** – Nuclear and Radiation Safety, 2010, No. 3(57), pages 3–9.

Enhancement of licensing for the types of activities related to atomic energy use is an important and timely task. The Article considers different approaches to its solution. There are various opinions on this matter, and one of them is presented in this Article.

The Author's position is based on the proposed classification of radiation facilities as per the potential hazard property thereof. In particular, nuclear facilities are subdivided into 10 classes. This classification is published with the purpose of discussion and subsequent application at differential approach to enhancement of licensing. Fig. 1. Table 1. Bibl. 14.

*Key words:* radiation facility, licensing, classification, safety, nuclear power, fission products, nuclear materials, radionuclide sources.

### **УДК 621.039**

Бородкин П.Г. **Расчетно-экспериментальный анализ влияния распределения выгорания топлива ВВЭР-1000 на поле нейтронов за корпусом реактора.** – Ядерная и радиационная безопасность, 2010, № 3(57), с. 10–23.

Для обеспечения надежности и безопасности эксплуатации энергоблоков АЭС с ВВЭР необходимо достоверно контролировать распределение энерговыработки (выгорания) в активной зоне. Скорость и плотность делений в объеме активной зоны определяют распределение энерговыделения, а количество делений – распределение энерговыработки и выгорания. Распределение энерговыработки, в особенности в периферийной части зоны, определяет интегральную по времени утечку (флюенс) нейтронов и их распределение вне активной зоны. В данной работе представлен анализ влияния распределения энерговыработки (выгорания) по объему активной зоны ВВЭР-1000 на результаты измерения и расчета интегральной утечки нейтронов через корпус реактора. Измерения проводились нейтронно-активационными детекторами в течение кампании за корпусами реакторов разных энергоблоков с ВВЭР-1000. Было обнаружено, что при использовании источника нейтронов, подготовленного на основе расчетного выгорания, наблюдается систематическое расхождение расчета и эксперимента в аксиальном распределении утечки (флюенса) быстрых нейтронов. В работе предложен метод подготовки источника на основе данных СВРК, собранных за всю кампанию, который показал улучшение сходимости расчета и эксперимента на 10 – 15 %. Решая обратную задачу, по результатам измерений утечки нейтронов, расчетов зоны и данных СВРК предложено восстанавливать распределение источника нейтронов в зоне (в периферийной части) для альтернативной оценки распределения энерговыработки (выгорания). Рис.14. Библ. 7.

*Ключевые слова:* ВВЭР, СВРК, ДПЗ, выгорание топлива, энерговыработка, нейтронно-активационные детекторы, расчетно-экспериментальный анализ.

Borodkin P.G. **Calculational-experimental analyses of influence of VVER-1000 fuel burn-up distribution influence on the ex-vessel neutron field.** Nuclear and Radiation Safety, 2010, № 3(57), pages 10–23.

To provide the safe operation of NPP units with VVER reactors it is necessary to evaluate reliably a power output (fuel burn-up) distribution in the volume of reactor core. Rate and density of fissions in the core volume determine power distribution, and number of fissions result in power output and fuel burn-up distributions. Therefore power output distribution, especially in peripheral part of core, correlates with time-integral neutron leakage (neutron fluence) and its distribution in ex-core region. Paper deals with some investigations of VVER-1000 reactor core power output (fuel burn up) distribution and its influence on

measurements and calculations of the integral through-vessel neutron leakage. Neutron activation measurements were carried out in ex-vessel air cavity at different NPP units with VVER-1000 during different fuel cycles. Some disappearance of calculated and measured results in the axial distribution of fast neutron leakage (fluence) in case of neutron source preparation based on calculated fuel burn-up dependence were found out. During investigations new method of core source preparation based on use of power distribution data accumulated over the whole fuel cycle by in-core reactor monitoring systems including self-powered detectors and thermocouples was suggested. New results give improvement of coincidence of calculated and measured values on 10–15%. Solving the reverse task of alternative estimation of power output (fuel burn-up) distributions it was suggested to adjust a core neutron source distribution on the base of neutron leakage measurements, core calculations and in-core self-powered detectors measured data. Fig. 14. Bibl. 7.

*Key words:* VVER, SVRK (in-core monitoring system), DPZ (self-powered detectors – SPD), fuel burn-up, power output, neutron activation dosimeters, calculational experimental analysis.

**УДК 621. 039.548**

Малков А.П. **Классификация экспериментальных устройств по влиянию на ядерную безопасность исследовательских реакторов.** – Ядерная и радиационная безопасность, 2010, № 3(57), с. 24–31.

В статье предложена классификация экспериментальных устройств исследовательских реакторов по степени их влияния на физические характеристики реакторов, важные для ядерной безопасности. Классификация выполнена на основе результатов расчетно-экспериментальных исследований и эксплуатационных данных для различных экспериментальных устройств ряда исследовательских реакторов. Ее наличие позволяет установить этапы работы, необходимые и достаточные для обеспечения и обоснования ядерной безопасности исследовательского реактора при подготовке и проведении испытаний, и обоснованно оптимизировать объем подготовительных работ. Рис. 2. Табл. 2. Библ.14.

*Ключевые слова:* исследовательский реактор, экспериментальное устройство, обеспечение ядерной безопасности, нейтронно-физические характеристики, результаты исследований.

Malkov A.P. **Classification of experimental rigs regarding their effect on research reactor nuclear safety.** – Nuclear and Radiation Safety, 2010, No 3(57), pages 24–31.

The paper presents the classification of RR experimental rigs regarding the level of their effect on of reactors physical characteristics crucial for nuclear safety. The classification is based on the results of calculations and experiments as well as operating data of various experimental rigs of some research reactors. The classification allows defining stages of work necessary to provide and justify RR nuclear safety when preparing and conducting tests and, consequently, optimization of preparatory work. Fig. 2. Tabl. 2. Bibl. 14.

*Key words:* research reactor (RR), experimental rig, nuclear safety provision, neutron and physical characteristics, investigation results.