

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕРНИЗАЦИИ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭНЕРГОВЫДЕЛЕНИЯ ПО ОБЪЕМУ АКТИВНОЙ ЗОНЫ РЕАКТОРА ВК-50

© 2021 г. М. В. Маркелов^{1,*}, А. А. Скрябин^{1,2,**}, Е. В. Синявина¹, С. В. Орешин¹

¹ Акционерное общество “Государственный научный центр — Научно-исследовательский институт атомных реакторов”, Димитровград, 433510, Россия

² Димитровградский инженерно-технологический институт — филиал Национального исследовательского ядерного университета “МИФИ”, Димитровград, 433511, Россия

*e-mail: Markelov560@mail.ru,

**e-mail: Aa.Skryabin@yandex.ru

Поступила в редакцию 08.04.2022 г.

После доработки 10.04.2022 г.

Принята к публикации 12.04.2022 г.

На ИЯУ ВК-50, расположенной на площадке АО “ГНЦ НИИАР”, выполнены работы по переоснащению измерительной системы внутриреакторного контроля энерговыделения по объему активной зоны реактора методом активации медных проволочных индикаторов (МПИ) в “сухих” каналах реактора, переоснащение включало в себя модернизацию, как аппаратной, так и программно-методической части. Одной из причин перехода на новую измерительную систему было достаточно большое расхождение в результатах измерений при использовании старой аппаратуры, как по уровню активности, так и по форме распределения активаций между измерениями. В данной работе представлены результаты проведенной модернизации, описаны изменения, как в методической измерительной части, так и в программной обработке результатов измерений с определением распределения энерговыделения по объему активной зоны реактора. Приведена информация о тестовых расчетах предыдущей расчетной программы и новой. Заключительный этап проверки работоспособности аппаратуры сканирования МПИ представлял собой сравнение расчетных и экспериментальных данных. В результате проведенной модернизации была разработана программа “CU-PRUM”, которая учитывает современные условия работы активной зоны реактора и типы используемых средств вычислительной техники. Произведена замена измерительного оборудования для сканирования МПИ на более современное.

Ключевые слова: активационные измерения, медный проволочный индикатор, корпусной кипящий реактор, распределение энерговыделения, выгорание ядерного топлива

DOI: 10.56304/S2304487X21060146

1. КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ РЕАКТОРНОЙ УСТАНОВКИ ВК-50

На ИЯУ ВК-50 изучаются нейтронно-физические и теплогидравлические характеристики активной зоны кипящего реактора [1–3] с естественной циркуляцией теплоносителя, изучаются вопросы работоспособности и ресурсной стойкости материалов тепловыделяющих сборок и поглощающих элементов.

Реакторная установка ВК-50 представляет собой корпусной кипящий реактор с внутрикорпусной естественной циркуляцией теплоносителя и непосредственной выдачей пара из реактора на турбину. В качестве топлива используется диоксид урана с 3% обогащением по U-235 и водно-топливным отношением 3.0. Высота топливной

части в твэле составляет 1980 мм. ТВС состоит из 138 твэлов и 30 полых трубок-вытеснителей заполненных водой, снаружи ТВС имеет чехол с 2.5% содержанием бора. Конструкцией ТВС предусмотрена возможность замены нижнего хвостовика для использования ТВС как в рабочем исполнении, так и в топливной части рабочих органов ручного регулирования (РО РР).

Реактор ВК-50 по виду теплоносителя и замедлителя является водо-водяным. В качестве теплоносителя и замедлителя используется легкая кипящая вода высокой чистоты. Она отвечает основным требованиям, предъявляемым к замедлителям — состоит исключительно из элементов с низким массовым числом, слабо поглощает нейтроны и обладает хорошей замедляющей способностью.

Кипящая вода обладает высоким коэффициентом теплоотдачи. У нее высокая теплоемкость, и она эффективно отводит тепло с поверхности твэлов.

Активная зона реактора ВК-50 формируется из 90 ТВС в рабочих ячейках, 16 ТВС устанавливаемых в топливные части рабочих органов ручного регулирования и 3 рабочих органов быстродействующей аварийной защиты (РО АЗ).

2. ПРИЧИНЫ ПРОВЕДЕНИЯ МОДЕРНИЗАЦИИ

В декабре 2015 во время сканирования медных проволочных индикаторов был выявлен сбой в работе аппаратуры. Одной из причин нестабильной работы аппаратуры считали недостаточное время прогрева детектора. Для проверки данного факта в феврале 2016 было проведено повторное облучение и сканирование МПИ, по результатам которого также было выявлено расхождение по форме распределения. Повторные сканирования показали, что у всех МПИ имеется расхождение, как по уровню активности, так и по форме распределений активации. Предварительно облученный МПИ в ячейке 06–30 активной зоны реактора во время проведения сканирования показывал разную активность нуклида ^{64}Cu (период полураспада 12.7 часа) по длине всего участка.

Также форма распределения активности при каждом новом сканировании отличалась от предыдущего. В ходе проверки детектор прогревался более часа, при рекомендуемом времени прогрева не менее 30 минут, что исключает вероятность некорректной работы детектора из-за недостаточного времени прогрева. В связи с этим был проведен переход на новую измерительно-вычислительную систему (ИВС).

Переоснащение аппаратно-программного комплекса главным образом заключалось в использовании нового спектрометрического детектора УДС–ГЦ-40×40-RS-485 производства фирмы “Аспект”. Данный детекторный блок представляет собой одноплатный анализатор спектра и предназначен для спектрометрических измерений, обработки линейчатых спектров, а также гамма и альфа-спектрометрии. Установка новой системы включала в себя также разработку нового программного обеспечения (ПО) и прокладку кабеля соединения от стенда сканирования до измерительного участка.

3. МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭНЕРГОВЫДЕЛЕНИЯ НА ИЯУ ВК-50

Основной задачей контроля распределения энерговыделения в активной зоне реактора ВК-50 является оценка теплотехнических параметров

для текущего состояния активной зоны. Эта задача решается путем проведения замеров относительного распределения плотности потока нейтронов в каналах, установленных в двух секторах активной зоны и расчетного восстановления по ним (с использованием замеров теплотехнических параметров) распределения энерговыделения по объему активной зоны реактора. Для реализации этой задачи реактор оснащен системой “сухих” каналов. Каналы представляют собой вертикальные трубки из стали 1X18H10T диаметром 8×1 мм (и 6×1 мм) и длиной ≈ 10.5 м. Нижние концы трубок заглушены и устанавливаются ниже топливной части ТВС до 0.5 м. Верхний конец трубки открытый. Вывод трубок “сухих” каналов из реактора осуществляется через фланцы универсального верхнего блока. С внешней стороны трубки привариваются к штуцерам фланцев. Каналы с трубками изготавливаются, монтируются и демонтируются ежегодно при перегрузках реактора в ППР. Для исключения возможности истечения теплоносителя при разгерметизации “сухого” канала, на выходном штуцере каждого из них предусмотрено барьерное устройство. Открытие барьерного устройства производится только на время измерения полей энерговыделения активной зоны. Контролю подлежат такие параметры как: линейная мощность твэлов, мощность ТВС, коэффициент неравномерности по радиусу и высоте активной зоны, выгорание топлива в ТВС.

Контроль данных параметров проводят методом измерения активности участка облученного МПИ. Метод основан на измерении интенсивности γ -излучения изотопа ^{64}Cu предварительно облученного в “сухом” канале размещенном в центральной трубке тепловыделяющей сборки. Одновременно в активной зоне может происходить облучение в 17 “сухих” каналах. Полученные распределения активности ^{64}Cu соответствуют распределению нейтронного потока по высоте активной зоны реактора. Картограмма активной зоны с расположением измерительных каналов представлена на рис. 1.

После облучения МПИ помещаются в специальный защитный свинцовый контейнер для распада короткоживущих нуклидов и защиты персонала от потока γ -излучения. Через двое суток проводится сканирование облученных МПИ, при этом интенсивность γ -излучения находится на безопасном уровне для работы с ними. Также спустя двое суток после облучения уровень γ -излучения оптимальный для измерительной аппаратуры, так как за счет распада короткоживущих нуклидов форма распределения активности получается в достаточной степени ровной. При измерении каждый МПИ равномерно протягивается с помощью устройства протяжки из защитного

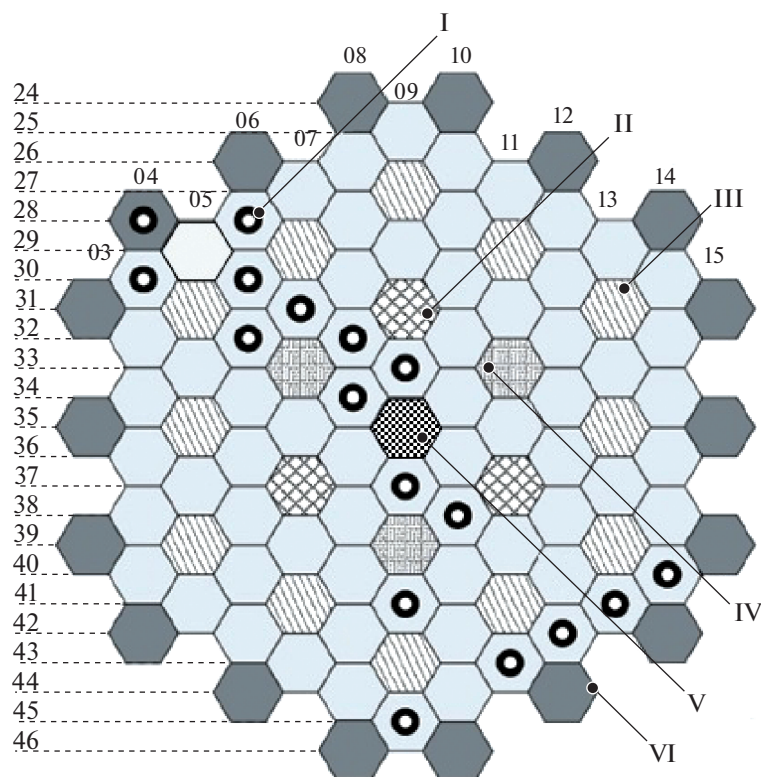


Рис. 1. Картограмма активной зоны реактора ВК-50 с измерительными “сухими” каналами: I — измерительный “сухой” канал; II — рабочий орган аварийной защиты; III — рабочие органы ручного регулирования первой — четвертой групп; IV — рабочие органы ручного регулирования шестой группы; V — рабочие органы ручного регулирования седьмой группы; VI — дополнительный ряд активной зоны.

контейнера в промежуточный, пересекая щель коллиматора под которым установлен детектор. Во время движения медного индикатора на измерительном участке фиксируется значение активности изотопа ^{64}Cu . Результаты зафиксированной активности МПИ регистрируются и передаются на ПК, в котором с помощью специализированного ПО “CuprumScan” формируется распределение активности по длине участка каждого облученного МПИ.

В дальнейшем проводится обработка экспериментальных результатов с помощью ПО “CUPRUM”, по которому определяются теплотехнические параметры активной зоны и формируются финальные результаты измерения. Полученные расчетные и экспериментальные данные сравниваются, оценивается отклонение данных, после чего делается вывод о корректности проведенного расчета и обработанных экспериментальных данных. Расчетная оценка проводится с помощью программы трехмерного моделирования теплотехнических и нейтронно-физических характеристик корпусного кипящего реактора БИПР-К.

4. ПРОГРАММНЫЕ СРЕДСТВА ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ ЭНЕРГОВЫДЕЛЕНИЯ

Модернизация [4, 5] программной части внутриреакторного контроля распределения энерговыделения заключалась в использовании комплекса программ “CuprumScan” и “CUPRUM” разработанных в АО “ГНЦ НИИАР”.

Программа “CuprumScan” используется для сканирования активности облученного МПИ и записи исходных данных облучаемых медных проволочных индикаторов. Программа “CuprumScan” считывает и сохраняет на ПК результаты сканирования по длине облученного медного индикатора, проводит предварительную обработку результатов, производит фильтрацию и выделяет участок сканирования, относящийся к активной зоне.

Для дальнейшей обработки результатов измерений используется программа “CUPRUM”. Программа “CUPRUM” предназначена для расчета распределения энерговыделения и выгорания топлива по объему активной зоны ВК-50. В качестве исходных данных программа “CUPRUM”

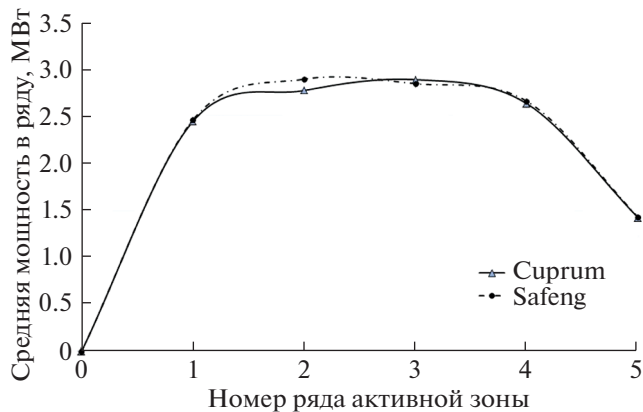


Рис. 2. Значения средней мощности в тепловыделяющей сборке по рядам активной зоны, рассчитанные в программах SAFENG и CUPRUM.

использует результаты полученные программой “CuprumScan”. Программа “CUPRUM” имеет блочную структуру, блоки выполнены в виде отдельных подпрограмм, работающих под управлением главной программы “CUPRUM”, которая определяет последовательность включения блоков в работу.

Программа “CUPRUM” по известным на начало кампании характеристикам загрузки активной зоны (распределениям выгораний и изотопному составу топлива для всех ТВС) и измеренным активностям МПИ рассчитывает для каждой ТВС:

- распределение линейной мощности твэлов;
- распределение по высоте плотности потока тепловых нейтронов;
- распределение выгорания по высоте ТВС;
- распределение по высоте теплогидравлических характеристик: массового паросодержания, истинного объемного паросодержания (с учетом межкассетного зазора), плотности теплоносителя.

Тестовые расчеты по данной программе и ее кросс-верификацию с предыдущей программой расчета “SAFENG” проводили по результатам облучения для 38-й кампании (октябрь 2010) реактора для активной зоны состоящей из пяти рядов ТВС. Выбор кампании для тестовых расчетов обусловлен тем, что в программе “SAFENG” не предусмотрена возможность обработки результатов сканирования индикаторов и определения энерговыделения для шестого ряда активной зоны.

Отличием программ “CUPRUM” и “SAFENG” является различная сетка разбиения высоты ТВС для определения распределения энерговыделения (20 и 21 точка по высоте, соответственно) и представления аппроксимации констант двумерными полиномами (3-й и 5-й степенью).

Результаты восьми измерений, проведенных в 38-ю кампанию, сравнивали по таким параметрам как мощность тепловыделяющей сборки, максимальный коэффициент неравномерности энерговыделения по высоте ТВС и максимальная линейная мощность твэлов. При анализе результатов было выявлено различие в восстановлении распределения активации медных проволоочных индикаторов в ячейках, в которых измерения не проводились, а также при определении коэффициентов подобия для этих ячеек. Сравнение результатов расчета по программам проводили для измерений с наибольшим числом каналов, в которых облучались индикаторы.

На рис. 2 приведены данные распределения средней мощности в ТВС по рядам активной зоны, рассчитанные по ПС “CUPRUM” и “SAFENG” на момент 3-го измерения МПИ в 38 кампании.

Видно, что максимальная расходимость по средней мощности в ТВС по ПС CUPRUM и SAFENG приходится на второй ряд активной зоны и составляет 4.3%, в других рядах расходимость не превышает 2%. Данное расхождение связано с усреднением исходных данных по высоте (20 и 21 точка).

Исследовалась также функциональная зависимость влияния изменения фактической плотности теплоносителя, исторической плотности теплоносителя и глубины выгорания в ТВС на коэффициент пропорциональности между активацией МПИ и энерговыделением в ТВС.

Дополнительно проведены расчеты для проверки:

- влияния отклонения скорости теплоносителя в ТВС на расчет энерговыделения при задании активаций в них одинаковыми. Отклонение скорости теплоносителя до 30% приводит к отклонению в распределении энерговыделения в ТВС, не превышающему 2%;
- влияния отклонения недогрева теплоносителя до линии насыщения на входе в ТВС на расчет энерговыделения. Отклонение недогрева теплоносителя на 2°C приводит к отклонению в распределении энерговыделения в ТВС, не более 3%;
- влияние изменения тепловой мощности реактора на расчет распределения энерговыделения в ТВС при задании распределений активации в ТВС одинаковыми. Мощность реактора определяет распределение плотности теплоносителя в ТВС. Мощность в ТВС изменяется пропорционально изменению задаваемой мощности реактора, с отклонением распределения энерговыделения, не превышающим 1%;
- изменений мощности в ТВС при задании выгораний в них от 0 до 34 МВт сут/кгU с шагом 2 МВт сут/кгU, при задании активаций в ТВС одинаковыми. Мощность в ТВС изменяется об-

Таблица 1. Результаты сравнения расчетных и экспериментальных параметров энерговыделения в ТВС

Параметр	БИПР-К	CUPRUM	Расхождение экспериментальных и расчетных данных, %
Максимальная мощность ТВС, МВт	1.36	1.32	–3.0
Максимальная линейная мощность			
– рабочей ТВС, Вт/см	74	76	2.6
– РО РР, Вт/см	101	99	–2.0
Максимальный коэффициент неравномерности относительного энерговыделения:			
– по радиусу активной зоны k_r	1.44	1.43	–0.7
– по высоте рабочей ТВС k_z	1.45	1.67	13.2

Таблица 2. Расходимость расчетных и экспериментальных данных при проведении измерений распределения энерговыделения в 2016–2021 гг.

Номер кампании (длительность кампании)	Количество измерений в кампании	Расходимость ¹ максимальной мощности ТВС, %	Расходимость коэффициентов неравномерности энерговыделения, %		Расходимость максимальной линейной мощности твэлов, %	
			по радиусу активной зоны	по высоте рабочей ТВС	в рабочих ТВС	в топливной части РО РР
45 (15.10.2016–07.08.2017)	7	8.4	8.5	–9.4	3.6	–14.5
46 (17.10.2017–04.07.2018)	7	2.3	–6.5	–7.4	–15.0	–17.0
47 (02.09.2018–27.06.2019)	8	–3.6	7.5	–11.3	–9.4	–15.6
48 (09.09.2019–17.07.2020)	7	10.4	12.4	–10.3	8.0	–12.9
49 (17.09.2020–12.04.2021)	2	9.6	11.3	–7.3	–1.7	–10.6

¹ Расходимость расчетных и экспериментальных данных.

ратно пропорционально изменению глубины выгорания в ТВС до 30 МВт сут/кгU, после 30 МВт сут/кгU идет ее возрастание.

Для определения метрологических характеристик точности измерения проведены статистические испытания последовательных облучений трех МПИ в одном канале с последующими многократными сканированиями распределений активации. Определена расширенная неопределенность ($\pm 4.2\%$) измерения ИВС скорости активации МПИ, при доверительной вероятности $P = 0.95$ на участке максимального энерговыделения – нижней половине активной зоны.

Последним этапом проверки работоспособности аппаратуры сканирования МПИ было сравнение расчетных и экспериментальных данных по программам БИПР-К и “CUPRUM”. 08.08.2016 проходило облучение МПИ для последующего сравнения с данными рассчитанными по БИПР-К, измерение проводилось в 9 “сухих” каналах измерительного сектора, результаты приведены в табл. 1.

По результатам сравнения параметров энерговыделения в ТВС максимальная расходимость между экспериментальными и расчетными данными составила 13.2%.

5. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЛУАТАЦИИ МОДЕРНИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭНЕРГОВЫДЕЛЕНИЯ

В последующих кампаниях реактора, начиная с 18.10.2016 по 12.04.2021 года, было проведено 31 измерение распределения энерговыделения по объему активной зоны.

В таблице 2 приведена максимальная расходимость расчетных и экспериментальных данных по кампаниям реактора за рассматриваемый промежуток времени по максимальной мощности ТВС, коэффициентам неравномерности энерговыделения по радиусу активной зоны и высоте рабочей ТВС, максимальной линейной мощности твэлов в рабочих ТВС и в топливной части РО РР.

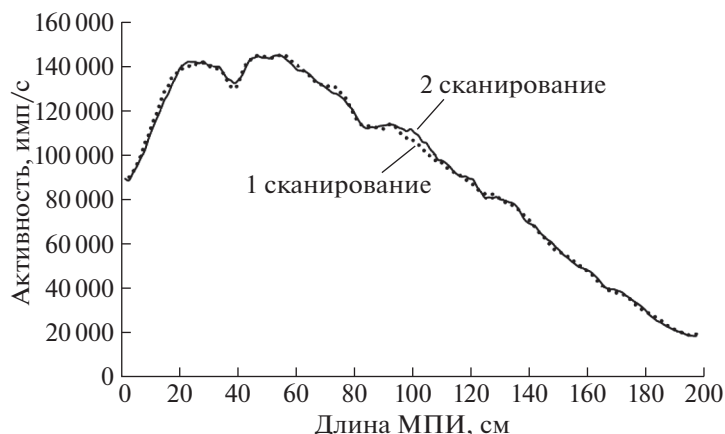


Рис. 3. Распределение активаций МПИ в ячейке 07-31 при двух сканированиях.

По результатам расчетного и экспериментального определения распределения энерговыделения активной зоны максимальная линейная мощность твэлов с учетом погрешности, как для рабочих ТВС, так и для топливных частей РО РР, находилась в пределах установленным технологическим регламентом. Расхождение между расчетными и экспериментальными данными не превысило 17%.

В целях проверки правильности работы аппаратуры, во время сканирования МПИ было проведено повторное (спустя 1 час) сканирование индикатора из ячейки 07-31 активной зоны. На рисунке 3 представлены распределения активности по результатам двух сканирований МПИ из ячейки 07-31.

Значение максимального отклонения активности между двумя сканированиями МПИ из ячейки 07-31 не превысило 3.8% на участке 0–104 см, и 5.2% на участке 105–195 см.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенной модернизации системы контроля распределения энерговыделения и выгорания топлива по объему активной зоны реактора ВК-50 была разработана программа “CUPRUM”, учитывающая современные условия работы активной зоны реактора и типы используемых средств вычислительной техники, заменено оборудование сканирования МПИ. Новое программное средство дало возможность определять распределение энерговыделения и выгорания топлива в ТВС активной зоны реактора с дополнительным шестым рядом из восемнадцати ТВС.

Проведенные проверочные расчеты сравнения предыдущей программы расчета “SAFENG” с новой “CUPRUM” показали хорошую сходимость.

Полученные результаты тестирования программы “CUPRUM” позволили использовать ее в составе прикладного программного обеспечения системы внутриреакторного контроля распределения энерговыделения при сопровождении эксплуатации реактора ВК-50.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Федякин Р.Е., Шмелев В.Е., Федулин В.Н., Садулин В.П., Адамовский Л.А. Нейтронно-физические и гидродинамические характеристики кипящего реактора ВК-50 с расширенной активной зоной. Препринт НИИАР, Димитровград, 1983. 12 с.
2. Богачев Г.А. Программа для расчета поля энерговыделения в шестигранных кассетах. Препринт ИАЭ-1985, М., 1969. 23 с.
3. Протопопов Д.П., Святкина Н.А., Бреусова Е.Г., Синявина Е.В. Экспериментальные исследования на реакторной установке ВК-50 с расширенной активной зоной // Сборник трудов АО “ГНЦ НИИАР” (сборник научных статей), 2016. Вып. 1. Димитровград: АО “ГНЦ НИИАР”, 2016. С. 3–12.
4. Абасов А.В., Орешин С.В., Маркелов М.В., Синявина Е.В., Широков С.В. Модернизация системы контроля распределения энерговыделения и выгорания топлива по объему активной зоны реактора ВК-50 // Программа конференции и тезисы докладов всероссийской молодежной конференции АО “ГНЦ НИИАР” “Научные исследования и технологические разработки в обеспечении развития ядерных технологий нового поколения”, Димитровград, 2018. С. 32.
5. Орешин С.В., Маркелов М.В., Широков С.В., Синявина Е.В., Абасов А.В. Методическое обеспечение контроля распределения энерговыделения по объему активной зоны реактора ВК-50 методом активации медных проволочных индикаторов // Научный годовой отчет АО “ГНЦ НИИАР” об основных исследовательских работах, выполненных в 2017 году. Димитровград, 2018. С. 54–55.

Results of Modernization of the Power Supply Distribution Control System in the Volume of the VK-50 Reactor Core

M. V. Markelov^{a, #}, A. A. Skriabin^{a, b, ##}, E. V. Sinyavina^a, and S. V. Oreshin^a

^a State Scientific Center Research Institute of Atomic Reactors, Dimitrovgrad, 433510 Russia

^b Dimitrovgrad Engineering and Technological Institute, National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Dimitrovgrad, 433511 Russia

[#]e-mail: Markelov560@mail.ru,

^{##}e-mail: Aa.Skryabin@yandex.ru

Abstract—The measuring system for the in-reactor control of energy release over the reactor core volume by activating copper wire indicators in the “dry” channels of the VK-50 reactor (State Scientific Center Research Institute of Atomic Reactors) has been re-equipped including the modernization of both hardware and software and methodological parts. One of the reasons for the transition to a new measuring system was a rather large discrepancy in the measurement results when using the old equipment, both in the level of activity and in the form of distribution of activations between measurements. The results of the modernization have been presented. Changes both in the methodological measuring part and in the software processing of the measurement results with the determination of the distribution of energy release over the volume of the reactor core have been described. Information on test calculations of the previous calculation program and the new one is given. The final stage of verifying the operability of the scanning equipment of copper wire indicators was a comparison of the calculated and experimental data. As a result of the modernization, the CUPRUM program has been developed, involving the modern operating conditions of the reactor core and the types of computer equipment used. The measuring equipment for scanning the copper wire indicator has been replaced with a more modern one.

Keywords: tropical cyclone, complete system of Navier–Stokes equations, difference methods

DOI: 10.1134/S2304487X21060146

REFERENCES

1. Fedyakin R.E., Shmelev V.E., Fedulin V.N., Sadulin V.P., Adamovskiy L.A. *Neitronno-fizicheskie i gidrodinamicheskie harakteristiki kipyashego reaktora VK-50 s rasshirennoi aktivnoy zonoj* [Neutronic and hydrodynamic characteristics of the boiling water reactor VK 50 with an expanded core]. Preprint GNC NIIAR, Dimitrovgrad, 1983, 12 p.
2. Bogachev G.A. *Programma dlia rascheta polia energovydeleniia v shestigrannykh kassetakh* [Program for calculating the field of energy release in hexagonal cassettes]. Preprint IAE-1985, Moscow, 1969, 23 p.
3. Protopopov D.P., Svyatkina N.A., Breusova E.G., Sinyavina E.V. *Eksperimentalnye issledovaniia na reaktornoj usyanovke VK-50 s rasshirennoi aktivnoy zonoj. Sbornik trydov AO “GNC NIIAR” (sbornik naychnykh statej). Vyp. I.* [Experimental studies at the VK-50 reactor facility with an expanded core. Proceedings of JSC “SSC RIAR” (collection of scientific articles), Is.1]. Dimitrovgrad, AO “GNC NIIAR” Publ., 2016, pp. 3–12.
4. Abasov A.V., Oreshin S.V., Markelov M.V., Sinyavina E.V., Shirokov S.V. *Modernizatsia sistemy kontrolya raspredelenia energovydelenia i vygoranoya topliva po obemy aktivnoi zony reaktora VK-50* [Modernization of the control system for energy distribution over the volume of the VK-50 reactor core]. *Programma konferentsii I tezis dokladov vserossiiskoi molodezhnoi konferentsii AO “GNC NIIAR” “Naychnye issledovaniia i tekhnologicheskie razrabotki v obespechenii razvitiia yadernykh tekhnologii novogo pokolenia*, Dimitrovgrad, 2018. 32 p.
5. Oreshin S.V., Markelov M.V., Shirokov S.V., Sinyavina E.V., Abasov A.V. *Metodicheskoe obespechenie kontrolya raspredelenia energovydelenia po obemy aktivnoi zony reaktora VK-50 metodom aktivatsii mednykh provolochnykh indikatorov* [Methodological support for monitoring for monitoring the distribution of energy release over the volume of the VK-50 reactor core by activating copper wire indicators]. *Naychnyi godovoi otchet AO “GNC NIIAR” ob osnovnykh issledovatel'skikh rabotakh, vypolnennykh v 2017 gody*. Dimitrovgrad. 2018, pp. 54–55.