

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ФИЗИЧЕСКОГО ПУСКА ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО ЯДЕРНОГО РЕАКТОРА ВИР-2М ПОСЛЕ РЕКОНСТРУКЦИИ 2011-2013 ГГ

### PULSED REACTOR VIR-2M AFTER RECONSTRUCTION 2011-2013 YEARS. MAIN RESULTS OF FIRST CRITICALITY

Л. Ю. Глухов, С. П. Котков, А. А. Кубасов, С. Ф. Мельников, А. А. Пикулев, О. В. Оловянный  
L. Y. Glukhov, S. P. Kotkov, A. A. Kubasov, S. F. Melnikov, A. A. Pikulev, O. V. Olovyanny

Российский Федеральный Ядерный Центр – Всероссийский  
научно-исследовательский институт экспериментальной физики  
Russian Federal Nuclear Center – All-Russian Research Institute of Experimental Physics

*Описаны этапы проведения физического пуска исследовательского ядерного реактора ВИР-2М после реконструкции 2011–2013 гг, а именно формирование активной зоны реактора и проведение энергетических пусков в штатных режимах. Представлены основные результаты критмассовых нейтронно-физических измерений. Приведены формы пусков реактора при работе в импульсном и статическом режимах.*

*There are described the first criticality stages of research nuclear reactor VIR-2M after reconstruction that took place in 2011–2013, namely, the reactor core formation and power start-ups in standard modes. Basic results of critical mass neutron-physics measurements are presented. There are given the forms of reactor start-ups at its operation in a pulsed and static mode.*

#### Введение

В апреле 2011 эксплуатация реакторной установки (РУ) ВИР-2М [1] в рабочих режимах была остановлена для проведения реконструкции некоторых её систем и узлов, проработавших более 40 лет, в частности, для замены системы управления и защиты (СУЗ) и разнотипных приводов импульсных стержней управления реактивностью. В 2013 г. после окончания работ по физическому пуску было подтверждено, что оснащение РУ ВИР-2М новой СУЗ существенно расширило функции управления реактивностью: впервые на установке ВИР-2М в функции СУЗ было заложено автоматическое поддержание физической мощности реактора и её регулирование по заданной оператором программе.

Целью работ проводимого физического пуска явилось восстановление активной зоны реактора ВИР-2М с обеспечением его ядерно-физических характеристик на уровне, имевшем место при первичном формировании активной зоны реактора в 2001 году и подтверждение работоспособности новой СУЗ (в частности при управлении реактором в штатных (импульсном и статическом) режимах работы).

Работы по физическому пуску были разделены на две последовательные этапа:

- 1) формирование активной зоны реактора (АЗ);
- 2) проведение серий энергетических пусков реактора в штатных режимах.

#### Формирование активной зоны реактора ВИР-2М

Формирование АЗ реактора проводилось в три стадии:

- I стадия – создание критической конфигурации АЗ при всех извлечённых из неё стержнях управления реактивностью (СУР) и в отсутствие загрузки экспериментальных каналов;
- II стадия – залив оставшейся части топливного раствора (ТР), слитого в 2011 г.;
- III стадия – завершение воссоздания первоначальной рабочей загрузки АЗ с добавлением воды (или разбавленного водой ТР) в корпус АЗ (для компенсации потерь воды в ходе 10-летней эксплуатации 2001–2011 гг) с целью максимального приближения количественных характеристик ТР в АЗ к тем, которые имели место при заливе топлива в 2001 г. в ныне установленный корпус АЗ. Эти действия обеспечили достижение значений основных характеристик реактора на том же уровне, что и до реконструкции РУ ВИР-2М.

На всех стадиях работ проводились нейтронно-физические измерения для определения реактивности АЗ и эффективности стержней управления реактивностью (СУР). Измерения проводились независимым от СУЗ каналом, обеспечивающим прямое измерение реактивности в единицах  $\beta_{эфф}$  [2], [3] (этот канал использовался и при сливе ТР в 2011 г.).

### Основные результаты первой стадии формирования активной зоны реактора

1) Главный итог – была получена минимальная критическая конфигурация АЗ.

Величина минимального критического объема ТР в АЗ определялась тремя способами, давшими практически совпадающие результаты: экстраполяцией непосредственных измерений реактивности (66,52 л); по периоду разгона реактора вблизи критсостояния (66,62 л); по кривым обратной скорости счёта (66,47 л). Среднее значение по трём методам составляет (66,54 ± 0,08) л.

Результаты первой стадии залива показали, что, как и ожидалось, критическая конфигурация АЗ была достигнута при объёме ТР на ~3,3 л меньше значения критобъёма 69,8 л, который имел место в 2001 году во время первоначального залива реакторного топлива в тот же корпус АЗ. Т.е. потеря части воды ТР за 10 лет его эксплуатации и, как следствие, увеличение концентрации урана в растворе привели к уменьшению критического объёма ТР в АЗ.

Уровень ТР (высота столба ТР в корпусе АЗ) при критической конфигурации АЗ уменьшился со значения  $H_{крит} = 449$  мм в 2001 году до  $H_{крит} = 429$  мм, т. е. на 20 мм.

2) Определена суммарная эффективность (физический вес) всех СУР при достигнутом критсостоянии ( $\rho_{СУР} = 6,31 \beta_{эфф}$ ). Эта величина на 0,53  $\beta_{эфф}$  меньше соответствующей величины 2001 года из-за разницы в ~ 20 мм в уровне погружения стержней в ТР (разной высоты столба ТР в АЗ) при разных критических объёмах в 2001 и последним значением.

### Основные результаты второй стадии формирования активной зоны реактора

1) Весь топливный раствор, слитый из АЗ реактора в октябре 2011 г., возвращён (за исключением неизбежных технологических потерь) в корпус АЗ в количестве 102,96 л (с концентрацией урана по изотопу  $^{235}\text{U}$  в ТР 69,8 г/л).

2) Определён критический объём с введённой в АЗ первой пары импульсных стержней (ИС-1); он равен ~ 77,6 л (в 2001 году соответствующий критобъём был ~ 84,0 л).

3) Определены основные ядерно-физические параметры АЗ при объёме ТР в АЗ 102,96 л: запас реактивности – ~ 6,59  $\beta_{эфф}$ ; полная эффективность СУР – ~ 11,2  $\beta_{эфф}$ . В полностью заглушенном состоянии АЗ величина коэффициента размножения  $k_{эфф} = 0,964$ .

Полученные значения ядерно-физических параметров реактора, как и ожидалось, не соответствовали имевшим место при формировании АЗ в 2001 году что подтверждало необходимость проведения первоначально запланированной третьей стадии залива ТР в АЗ реактора ВИР-2М с целью приведения этих параметров к значениям, приближенным к таковым в 2001 г.

### Основные результаты завершающей третьей стадии формирования АЗ реактора

Было завершено формирование АЗ реактора с параметрами, близкими к параметрам, имевшим место при формировании АЗ в 2001 году (табл. 1).

Характер изменения реактивностного состояния АЗ реактора по мере выполнения работ обозначенных в третьей стадии формирования АЗ представлены на графике рис. 1. На графике: сплошные линии с круглыми белыми точками – завершающие части графиков зависимости изменения реактивности при заливе в АЗ ТР с концентрацией урана 69,8 г/л (слитого в 2011 г.); штрихпунктирная линия – аналогичная зависимость при заливе 2001 года; точки в виде чёрных ромбов – результаты измерений реактивности при заливе дистиллированной воды и разбавленного ТР (с концентрацией урана 20,83 г/л); белые треугольники – результаты расчётного определения реактивности с использованием найденных значений величин  $\partial\rho/\partial V$  и  $\partial\rho/\partial C$ ; вертикальные пунктирные линии обозначают объёмы ТР, при которых проводились измерения

Таблица 1

Параметры активной зоны реактора, достигнутые в 2001 и 2013 годах

Параметр	2001 г.	2013 г.
Эффективность всех стержней управления, $\beta_{эфф}$	$11,5 \pm 0,2$	$11,4 \pm 0,3$
Суммарная эффективность двух стержней РС-1 и РС-2, $\beta_{эфф}$	$3,5 \pm 0,2$	$3,4 \pm 0,2$
Полный запас реактивности, $\beta_{эфф}$	$6,2 \pm 0,1$	$6,2 \pm 0,2$
Объём топливного раствора, л	$104,6 \pm 0,5$	$104,8 \pm 0,5$
Минимальная эффективность аварийной защиты, $\beta_{эфф}$	$1,6 \pm 0,1$	$1,6 \pm 0,1$
Концентрация урана $^{235}\text{U}$ в ТР, г/л	$67,9 \pm 3 \%$	$67,0 \pm 3 \%$

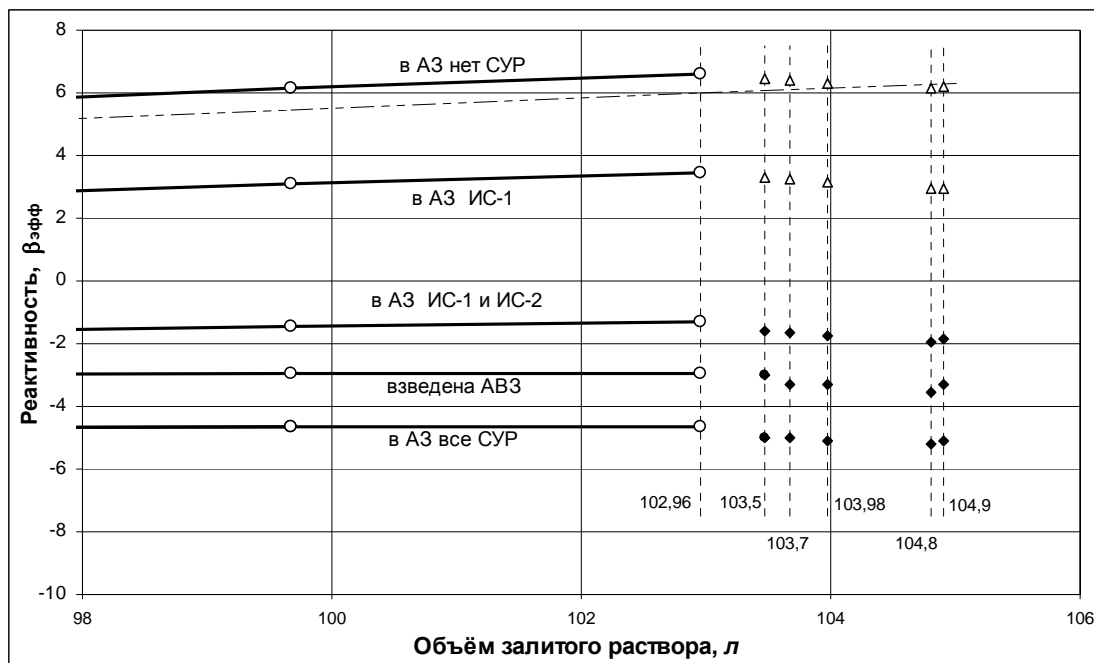


Рис. 1. Изменение реактивности АЗ реактора в процессе завершения её формирования

### Проведение серий энергетических пусков реактора в штатных режимах

На этапе формирования АЗ была решена задача по восстановлению АЗ реактора ВИР-2М с ядерно-физическими характеристиками на уровнях, имевших место в 2001 году. Поэтому следовало ожидать, что и другие основные характеристики реактора, например, параметры реакторного излучения (спектральный состав, пространственное распределение, уровни флюенса нейтронов и доз гамма-квантов) должны быть одинаковыми до и после реконструкции РУ, т. е. не требуются подробные исследования всех характеристик установки. Для подтверждения этого, достаточно было провести сравнение этих характеристик в минимально необходимом количестве измерений.

Некоторым экспериментам на этапе проведения энергетических пусков было уделено более пристальное внимание. Это связано с необходимостью проверок работоспособности в условиях реальной эксплуатации новых систем и оборудования, которые были введены в состав РУ ВИР-2М при её реконструкции (СУЗ, привода импульсных стержней ИС-1 и ИС-2).

### Результаты исследований при работе реактора в статическом режиме

На данном этапе физического пуска проводились работы по следующим направлениям:

- Настройка и проверка работоспособности штатного реактиметра СУЗ на базе каналов «МИРАЖ МБ». Калибровка стержней управления реактивностью.
- Измерение пространственного и энергетического распределения нейтронов и гамма-квантов по высоте экспериментальных каналов.

- Калибровка штатных каналов контроля мощности по энерговыделению, выставление уставок на сброс.
- Проверка срабатывания системы аварийной защиты по уровню мощности и по периоду разгона. Определение скорости введения отрицательной реактивности стержнями РС-1 и РС-2 (в совокупности и каждым в отдельности) при сбросе этих СУР с высоты 100 мм и с высоты 600 мм.
- Проверка работоспособности системы охлаждения-нагрева АЗ. Определение температурного и квазистатического коэффициентов реактивности.
- Проверка работоспособности штатной системы автоматического поддержания заданной величины статической мощности и работы реактора по заданной программе.
- Определение радиационной обстановки вокруг реактора.
- Определение возможности длительной работы реактора на различных уровнях статической мощности.

В ходе этого этапа физпуска было проведено 6 статических пусков реактора, в процессе подготовки к которым, во время и после их проведения осуществлялась проверка работоспособности всех систем и узлов РУ ВИР-2М.

Проведены калибровки суммарной эффективности групп стержней управления реактивностью (РС-1+ РС-2) и ИС-1 при определённых положениях других стержней, которые практически совпали с аналогичными калибровками в предыдущую эксплуатационную кампанию. На графике рис. 2 представлен характер изменения физического веса группы стержней (РС-1+ РС-2) по мере извлечения их из АЗ реактора при полностью погруженных других стержнях.

Найдены эмпирические формулы для описания этих калибровок. Для группы стержней (РС-1+ РС-2) – формула (1), для группы стержней ИС-1 – формула (2):

$$\rho_{(PC-1+PC-2)}/\rho_{\max(PC-1+PC-2)} = 1,015 \cdot \left(1 - e^{-0,0079h}\right)^{1,13}, \quad (1)$$

$$\rho_{ИС-1}/\rho_{\max ИС-1} = 1,024 \cdot \left(1 - e^{-0,0064h}\right)^{1,2}. \quad (2)$$

где:  $\rho$  – изменение (в единицах  $\beta_{эфф}$ ), вносимое в реактивность АЗ при извлечении рассматриваемого СУР из АЗ на высоту  $h$  (мм);  $\rho_{\max}$  – полный физический вес соответствующего СУР.

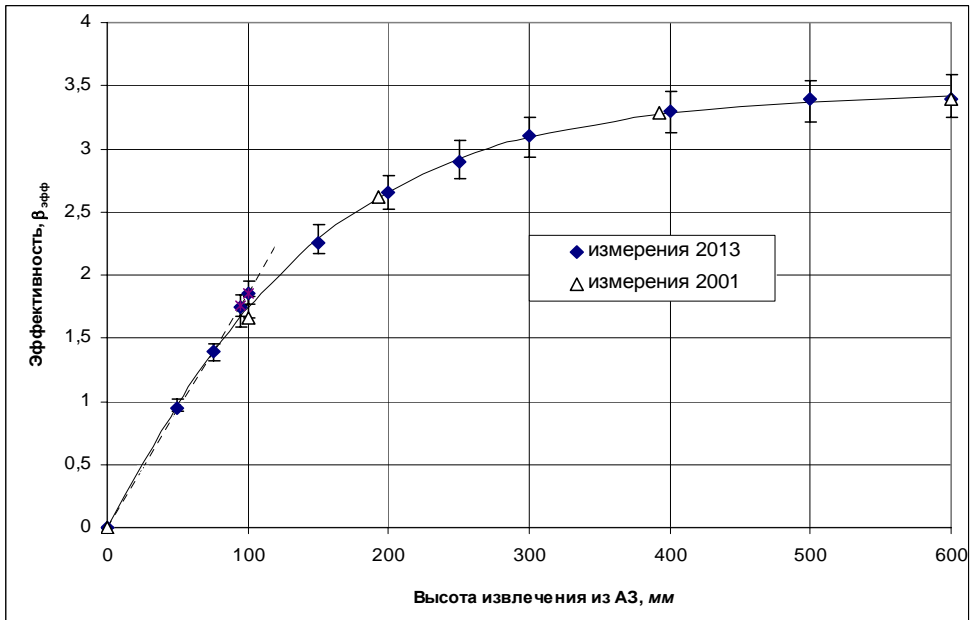


Рис. 2. Калибровка суммарной эффективности группы стержней (РС-1 + РС-2) при полностью введенных в АЗ стержнях ИС-1 и ИС-2 (при температуре  $\sim 22^\circ\text{C}$ )

Проведены измерения, показавшие идентичность спектра нейтронов до и после реконструкции РУ ВИР-2М, а также распределений нейтронов (рис. 3) и гамма квантов в эксперименталь-

ных каналах реактора и максимальных значений флюенса нейтронов и дозы гамма-излучения ЦК и ПСК при статической работе реактора.

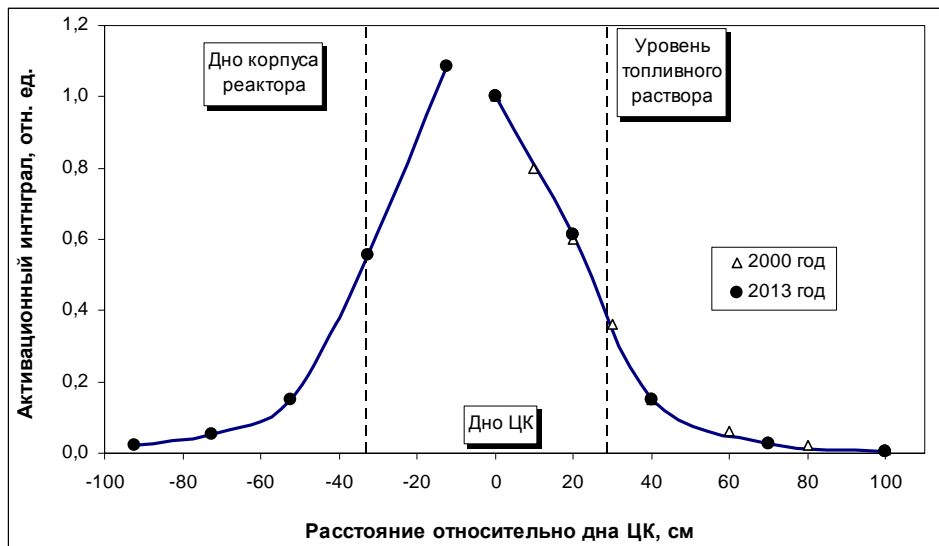


Рис. 3. Распределение флюенса быстрых нейтронов по оси реактора

Определено полное время аварийного сброса от момента появления причины сброса стержней РС-1 и РС-2 до достижения ими крайнего нижнего положения. Оно оказывается не более 0,6 с.

При внешнем нагреве АЗ (с помощью электронагревателей) температура в различных элементах системы охлаждения – нагрева (СОН) измерялась разными датчиками (отличающимися по принципу действия). Параллельно с определением температуры АЗ проводились измерения её реактивности, по результатам которых определялся температурный коэффициент гашения реактивности (ТКР). Найдена зависимость ТКР от температуры на полностью заглушенном реакторе, когда все СУР введены в АЗ, а также выполнены несколько измерений для других конфигураций АЗ, связанных с различными положениями СУР. Среднее значение ТКР для диапазона измеряемых температур от 22 °С до 80 °С составило 0,05  $\beta_{эфф}/K$ .

По измерениям в двух статических пусках реактора (без использования СОН) был определён квазистатический (энергетический) коэффициент гашения реактивности, среднее значение которого составило 0,17  $\beta_{эфф}/MДж$ .

Была проведена проверка работоспособности автоматического регулятора мощности (АРМ) – системы СУЗ, обеспечивающей новые для реактора ВИР-2М функции – автоматическое поддержание заданной величины статической мощности и работа реактора по заданной программе (рис. 4).

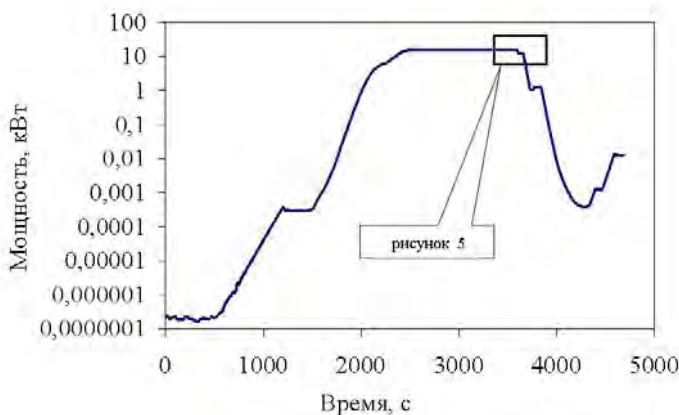


Рис. 4. Регулирование мощности реактора ВИР-2М в статическом пуске № 1

АРМ был включён после того, как реактор вручную ~20 минут удерживался на мощности 15,6 кВт (рис. 5). Постоянная регистрация мощности на виртуальной диаграмме одной из РСО пульта управления в режимах с ручным и автоматическим поддержанием мощности позволила наглядно показать преимущество работы с АРМ. Была проверена также способность АРМ управлять реактором по заранее заданной программе с автоматическим выходом на пять различных уровней статической мощности с разницей до 5 порядков.

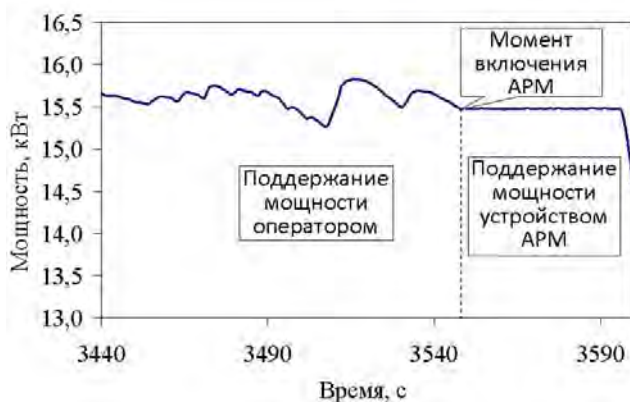


Рис. 5. Ручное и автоматическое поддержание мощности реактора № 1

На примере статического пуска № 4, который был выполнен с помощью АРМ (реактор был выведен с периодом 30 с на мощность 20 кВт) было показано, что в настоящее время запас реактивности АЗ и производительность СОН установки ВИР-2М могут обеспечить непрерывную работу на мощности 20 кВт в течение не менее 1,5 часов.

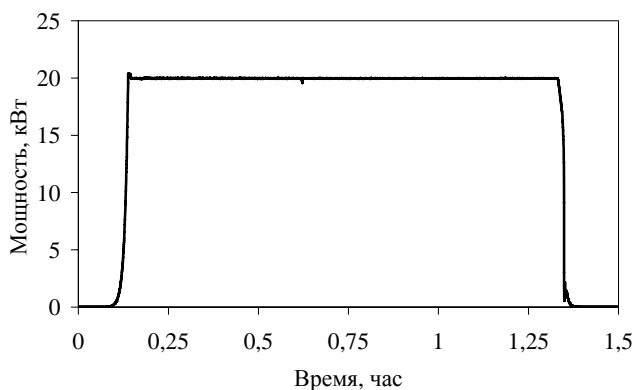


Рис. 6. Статический пуск № 4

### Результаты исследований при работе реактора в импульсном режиме

На данном этапе физического пуска проводились работы по следующим направлениям:

- Генерирование серии последовательно возрастающих по энерговыделению импульсов делений (проверка работоспособности реактора в импульсном режиме с энерговыделением до 62 МДж) с регистрацией и определением параметров импульсов делений (формы импульса, асимптотического периода разгона, длительности импульса на уровне 50 % от максимальной мощности, полного энерговыделения, реализованной реактивности) и установление связи между ними.

- Определение эффективности импульсных стержней и запаса реактивности АЗ. Определение зависимости эффективности СУР от загрузки экспериментальных каналов. Экспериментальное определение максимально возможного энерговыделения в импульсе на мгновенных нейтронах с закрытым нижним защитным шибером и полностью извлечёнными из АЗ регулирующими стержнями.

– Измерение пространственного и энергетического распределения нейтронов и гамма-квантов в экспериментальных каналах и их зависимости от загрузки каналов.

В ходе этого этапа физпуска проведено 16 импульсных пусков реактора на мгновенных нейтронах, в процессе подготовки к которым, во время и после их проведения осуществлялась проверка правильности работы систем и узлов РУ ВИР-2М, обеспечивающих импульсный режим работы реактора и осуществляющих регистрацию изменения параметров реактора в этом режиме и после его окончания.

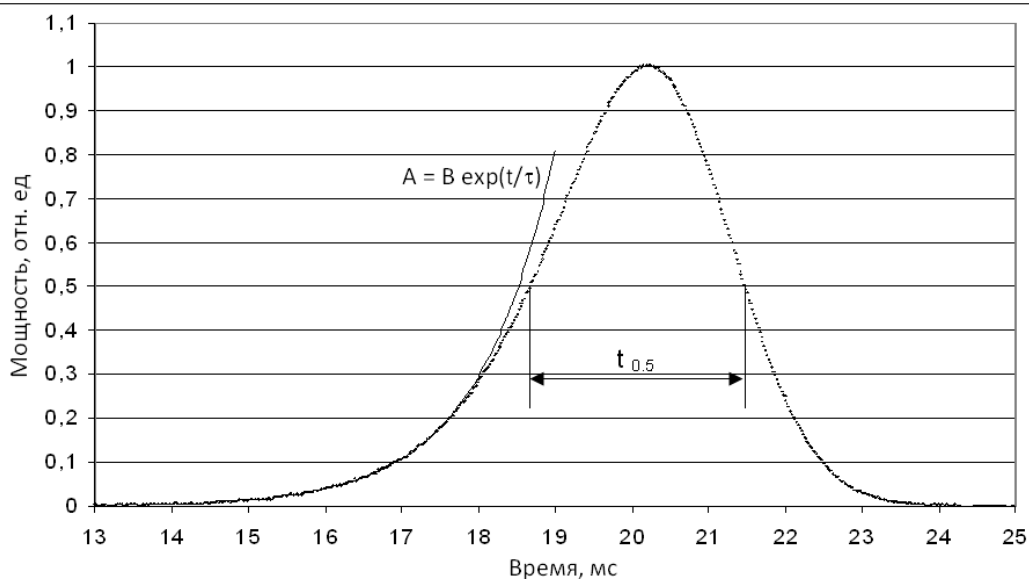


Рис. 7. Основные временные параметры импульса мощности реактора ВИР-2М

На рис. 7 приведена типичная форма импульса реактора ВИР-2М (импульс № 9, энерговыделение 58,9 МДж, период нарастания мощности  $\tau = 1,00$  мс, «полуширина»  $t_{0,5} = 2,80$  мс, реализованная реактивность  $\rho = 5,93 \beta_{эф}$ . В табл. 2 приведены сводные данные об условиях генерации 16 импульсов мощности.

Таблица 2

Условия генерации и измеренные параметры импульсов

№ имп	ИС-1 в крит-сост, мм	РС перед имп, мм	Извлекались СУР	Детектор	Измеренные параметры импульсов				
					Временные параметры, мс		Энерговыделение, МДж		
					полуширина ( $t_{0,5}$ )	период	по $2H_2+O_2$	по Ni	по $t_{0,5}$
1	3	4	5	6	7	8	9	10	12
1	103,8	0	все ИС	ВКД	14,5	5,18	7,0	10,4	7,9
2	108,9	50	все ИС	ВКД	6,37	2,53	18,0	20,0	19,9
3	107,3	100	все ИС	ВКД	4,76	1,810	26,8	27,8	28,5
4	114,3	150	все ИС	ВКД	4,07	1,49	32,5	33,4	34,9
5	115,8	200	все ИС	ВЭД	3,56	1,315	40,1	42,1	41,8
				ВКД	3,60	1,317			41,2
6	112,4	250	все ИС	ВКД	3,26	1,19	46,8	48,3	47,3
7	110,7	300	все ИС	ВКД	3,03	1,09	52,0	53,3	52,7
8	102,3	350	все ИС	ВКД	2,81	1,02	57,8	59,7	57,5
9	112,3	400	все ИС	ВЭД	2,80	0,992	58,4	59,0	59,4
				ВКД	2,81	1,005			59,1
10	106,7	600	все ИС	ВЭД	2,76	0,984	60,8	59,2	60,7
				ВКД	2,77	0,983			60,4

№ имп	ИС-1 в крит. сост., мм	РС перед имп., мм	Извлекались СУР	Детектор	Измеренные параметры импульсов				
					Временные параметры, мс		Энерговыделение, МДж		
					полуширина ( $t_{0,5}$ )	период	по $2H_2+O_2$	по Ni	по $t_{0,5}$
11	116,0	600	ИС-1	ВЭД	8,85	3,64	12,5	14,7	13,6
				ВКД	8,81	3,58			13,7
12	103,0	600	ИС-2	ВЭД	6,91	2,71	17,0	19,1	18,1
				ВКД	6,93	2,69			18,0
13	61,3	250	все ИС	ВЭД	2,90	1,050	50,8	53,8	56,4
				ВКД	2,95	1,061			54,8
14	59,0	600	ИС-1	ВЭД	5,62	2,23	21,9	22,5	23,2
				ВКД	5,58	2,22			23,4
15	54,8	600	все ИС	ВЭД	2,62	0,936	62,0	61,6	66,0
16	61,0	600	все ИС	ВЭД	2,63	0,936	61,9	62,3	65,5
				ВКД	2,70	0,946			62,9

Опираясь на данные табл. 6 были найдены эмпирические зависимости – формулы (3), (4) и (5) – между четырьмя параметрами импульса – энерговыделением  $E$  (в МДж), «полушириной»  $t_{0,5}$  (в мс), периодом нарастания мощности  $\tau$  (в мс) и реактивностью  $\rho$  (в  $\beta_{эф}$ ), реализованной в импульсе:

$$t_{0,5} = 1 + \frac{107}{E}, \quad (3)$$

$$\frac{t_{0,5}}{\tau} = 2,4 + \frac{E}{E + 60}, \quad (4)$$

$$\rho = 1 + \frac{17 \cdot E \cdot (E + 42)}{(E + 60) \cdot (E + 107)} \quad (5)$$

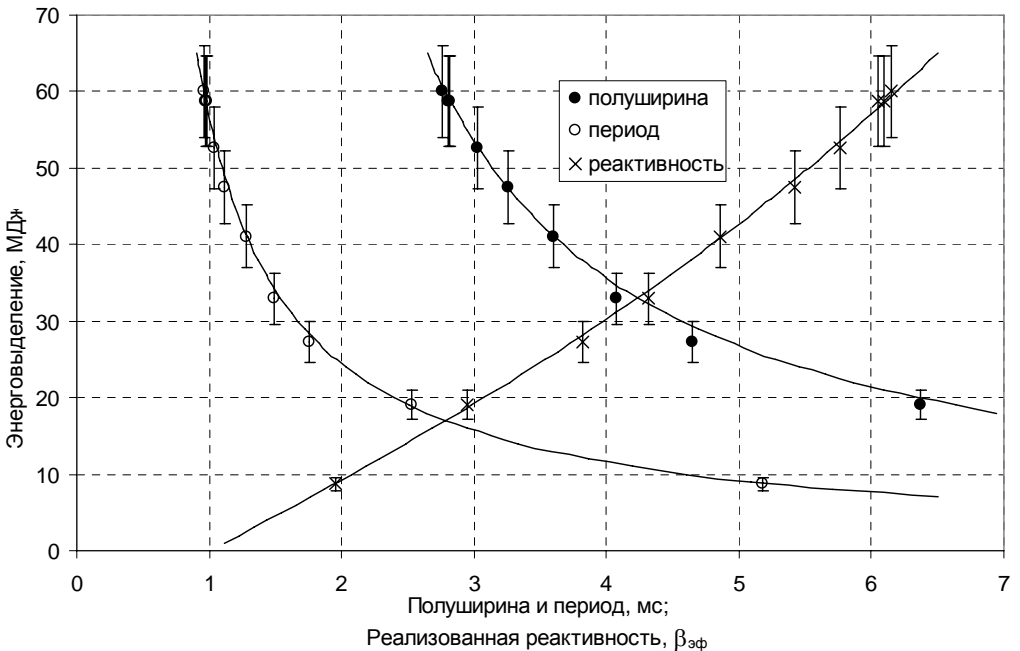


Рис. 8. Зависимости между параметрами импульса и энерговыделением; точки – экспериментальные значения, линии – расчёт по эмпирическим формулам (3), (4) и (5)



На рис. 8 тонкими линиями графически показаны зависимости временных параметров импульса и реактивности, реализованной в импульсе, от энерговыделения, рассчитанные с помощью формул (3), (4) и (5). На эти расчётные линии нанесены экспериментально полученные точки, соответствующие данным табл. 2. Видно, что результаты непосредственных измерений по зарегистрированной форме импульса хорошо коррелируют с результатами расчётов по эмпирическим соотношениям (3), (4) и (5). Таким образом, эти соотношения между различными параметрами импульса, использовавшиеся в предыдущей эксплуатационной кампании РУ ВИР-2М, остаются справедливыми и после проведения её реконструкции.

Были определены положения СУР в критсостояниях реактора с различными нагрузками центрального экспериментального канала (ЦК) и полусферического экспериментального канала (ПСК). Результаты этого приведены в колонках 2–5 табл. 3.

Таблица 3

Определение физического веса штатных нагрузок каналов ПСК и ЦК; влияние нагрузок на эффективность СУР

Наименование нагрузки	Положение СУР в критсостоянии, с указанной нагрузкой, мм				Все СУР введены в АЗ		Извлечены из АЗ только РС	
	РС-1	РС-2	ИС-1	ИС-2	ρ-сть АЗ, $\beta_{эфф}$ (измер.)	вес нагрузки, $\beta_{эфф}$	ρ-сть АЗ, $\beta_{эфф}$ (измер.)	вес нагрузки, $\beta_{эфф}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Без нагрузки	600	600	106,1	0	-5,28	нет	-1,96	нет
Нижний шибер	600	600	61,3	0	-4,35	+0,93	-1,17	+0,79
Полусферический	600	600	246,1	0	-7,75	-2,47	-3,78	-1,82
Конвертор для ПСК	600	600	242,6	0	-7,56	-2,28	-3,77	-1,81
Конвертор для ЦК	600	600	145,9	0	-5,40	-0,12	-2,42	-0,46
Погл. стерж. для ЦК	600	600	174,0	0	-5,49	-0,21	-2,64	-0,68
Графит. отражатель	115,3	115,3	0	0	-1,79	+3,49	-	-

В целом, работы по воссозданию АЗ реактора ВИР-2М после его реконструкции и по исследованию реактора во всех режимах показали, что

- ядерно-физические параметры АЗ полностью соответствуют параметрам от 2001 г;
- новая система управления и защиты позволяет осуществлять надёжный контроль состояния реактора и управление его узлами во всех режимах, существовавших до реконструкции, – подготовительном, статическом и импульсном, – обеспечивая требуемую безопасность работ во всех режимах;

– важнейшим качеством новой СУЗ стала возможность автоматического регулирования физической мощности по заданной программе или её длительного (десять часов) поддержания на высоком уровне;

– реконструкция приводов ИС управления реактивностью позволила использовать всю эффективность СУР для длительного поддержания высокого уровня мощности в статическом режиме.

Список литературы

1. Воинов А. М., Колесов В. Ф., Матвеев А. С., Мельников С. Ф., Левицкий И. В., Маслов Г. Н, Павловская Л. М., Самодуров Л. А., Гладков В. С. Водный импульсный реактор ВИР-2М и его предшественники // ВАНТ. Сер. Физика ядерных реакторов. 1990. Вып. 3. С. 3–15.

2. Попов В. А., Дюдяев А. М. Применение обращенного уравнения кинетики реактора для контроля реактивности подкритических размножающих систем // Атомная энергия, 1997. Т. 82. Вып. 3. С. 238–241.

3. Воинов А. М., Мельников С. Ф., Попов В. А. Абсолютные измерения реактивности исследовательского растворного реактора ВИР-2М при замене корпуса активной зоны // ВАНТ. Серия: Физика ядерных реакторов. 2000. Вып. 2/3. С. 47–51.