

## РЕЗУЛЬТАТЫ ФИЗИЧЕСКОГО ПУСКА ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ ЯДЕРНОЙ УСТАНОВКИ ИГРИК-2 В СТАЦИОНАРНОМ РЕЖИМЕ

А. А. Манаков, А. Ш. Хамидулин, В. В. Захаров, Д. В. Хмельницкий, О. А. Мингазов,  
С. А. Андреев, С. В. Шугаев, С. Г. Порубов

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ», г. Снежинск Челябинской обл.

Описаны системы исследовательской ядерной установки ИГРИК-2. Представлены результаты физического пуска ИЯУ ИГРИК-2 в стационарном режиме.

**Ключевые слова:** исследовательская ядерная установка, физический пуск, критическое состояние на запаздывающих нейтронах.

RESULTS OF THE UNIT PHYSICAL LAUNCH OF A RESEARCH NUCLEAR INSTALLATION «IGRIK-2» IN STATIONARY MODE / A. A. MANAKOV, A. SH. KHAMIDULIN, V. V. ZAKHAROV, D. V. KHMELNICKY, O. A. MINGAZOV, S. A. ANDREEV, S. V. SHUGAEV, S. G. PORUBOV // The systems of the research nuclear installation are described. The results of the unit physical launch of the reactor in steady state mode is given.

**Key words:** the research nuclear installation, the unit physical launch, delayed critical state.

### Введение

В середине 1990-х гг. была начата разработка ИЯУ ИГРИК-2 (исследовательская ядерная установка Импульсный гомогенный реактор испытательного комплекса - 2). Реактор ИГРИК-2 проектировался как установка с уникальными среди растворных импульсных реакторов характеристиками: большим доступным пространством для облучения образцов в виде сквозного центрального канала переменного сечения; флюенсом нейтронов не менее  $10^{15}$  см<sup>-2</sup> при генерировании максимального импульса делений 130 МДж и полушириной менее 3 мс. ИЯУ ИГРИК-2 может работать в импульсном и стационарном режимах.

Сооружение установки было завершено в 2016 г. Физический пуск начат в июле 2016 г. В декабре 2017 г. реактор ИГРИК-2 введен в опытную эксплуатацию в стационарном

режиме работы. Основной целью физического пуска в стационарном режиме работы являлось экспериментальное определение нейтронно-физических и технологических параметров реактора.

### Описание систем ИЯУ ИГРИК-2

В состав реактора входят корпус АЗ с механизмом регулирующих элементов – импульсных стержней с поглотителем нейтронов; стенд, состоящий из опорной плиты и смотровой площадки, которые предназначены для размещения корпуса АЗ; технологическое оборудование, используемое для приготовления, хранения и подачи топлива в корпус АЗ; пульт управления.

Пульт управления реактором находится в отдельном здании, расположенном на рас-

стоянии 400 м от реакторного помещения. Технологическая система реактора ИГРИК-2 состоит из растворного и газового контуров. Большая часть технологического оборудования расположена в прямках, выполненных в бетонном основании около стенда реактора. В них имеются колодцы, в которых установлены основной и резервный баллоны-хранилища жидкого топлива, газовый баллон и баллон для сбора раствора. В прямках также размещены герметичный насос-дозатор, обеспечивающий подачу раствора в корпус АЗ, газовый насос и управляющая запорная арматура (сильфонные клапаны с пневматическими приводами). Технологические прямки сверху закрыты стальными плитами толщиной 30 см, которые служат радиационной защитой.

Основным элементом конструкции реактора является корпус АЗ, который представляет собой сварной цилиндрический сосуд из стали 30ХГСА. На поверхность внутреннего объема корпуса нанесена коррозионно-защитная наплавка. Изображение корпуса АЗ реактора ИГРИК-2 приведено на рис. 1. Корпус имеет сквозной центральный экспериментальный канал переменного диаметра. В верхней крышке корпуса АЗ предусмотрено 8 отверстий. Семь из них использованы для установки силовых гильз. Внутри гильз находятся импульсные стержни, которые можно перемещать в вертикальном направлении. Одно отверстие предназначено для выравнивания давления в корпусе АЗ и баллонах-хранилищах. Корпус с наружной стороны имеет свинцовую облицовку.

На боковых стенках внутренней полости корпуса АЗ размещены демпферы в виде выступов. Конфигурация таких выступов образует своего рода лабиринт, который предназначен для снижения динамических нагрузок на крышку корпуса. Раствор, разлетающийся во время импульса делений, проходит по этому лабиринту и частично теряет свою кинетическую энергию при изменении направления движения. Применение такой конструкции позволило заметно растянуть во времени и ослабить удар раствора в верхнюю крышку корпуса АЗ. В основании кор-

пуса предусмотрено отверстие, через которое осуществляется подача и слив топливного раствора.

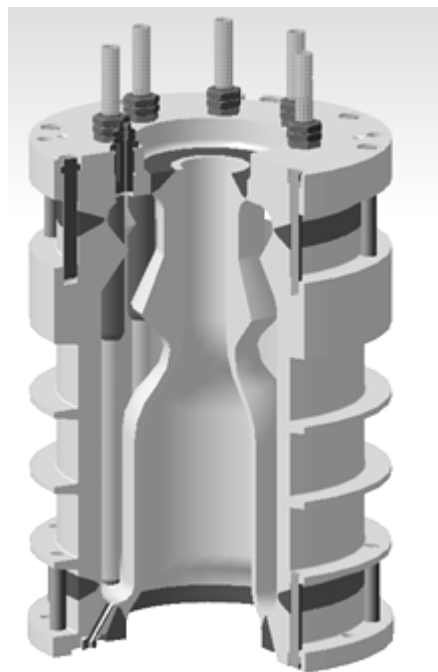


Рис. 1. Корпус АЗ реактора ИГРИК-2

Регенерация гремучего газа проводится непосредственно в корпусе АЗ с помощью его воспламенения от искровой запальной свечи. Образующаяся после подрыва гремучего газа вода стекает в баллон-хранилище.

Облучаемые образцы можно размещать в центральном канале и/или снаружи реактора вблизи боковой поверхности корпуса АЗ, например, напротив окна в свинцовой защите. В центральный канал образцы загружаются с помощью специального механизма загрузки образцов.

### **Экспериментальное определение критического объема топливного раствора в корпусе активной зоны**

Топливом реактора ИГРИК-2 является водный раствор уранилсульфата, содержащий небольшое количество кадмия в виде соли  $CdSO_4$ . Объем топливного раствора (ТР) составляет 136 л, концентрация урана – 74 г/л, концентрация кадмия – 0,15 г/л. Для сборки критической конфигурации и работы в ста-

ционарном режиме активной зоны ТР подается из баллона-хранилища в корпус активной зоны. В остальное время ТР находится в ядерно-безопасном баллоне-хранилище. В этой связи важным технологическим параметром является воспроизводимость критического состояния, которая может служить критерием неизменности состава ТР и (или) исправности средств технологического контроля.

Во время физического пуска реактора были проведены эксперименты по определению критического состояния на запаздывающих нейтронах с выведенными из АЗ и с введенными в АЗ импульсными стержнями и проверена воспроизводимость критических состояний. Во время выполнения работ штатный нейтронный источник постоянно находился вблизи АЗ на своем штатном месте в верхнем упоре. Окна биологической защиты корпуса АЗ закрыты. Контроль нейтронного потока в ходе заливки обеспечивался штатными импульсными каналами.

Расчет обратного коэффициента умножения в процессе вывода реактора в критическое состояние на запаздывающих нейтронах проводился по результатам измерений скорости счета импульсных каналов. На рис. 2 приведен результирующий график линейной аппроксимации обратного коэффициента умножения « $1000/Q$ ».

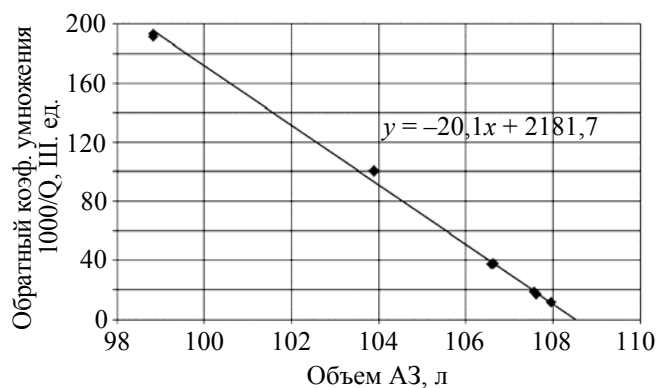


Рис. 2. Линейная аппроксимация обратного коэффициента умножения « $1000/Q$ » по показаниям импульсных каналов ИК1 и ИК2 от количества залитого в АЗ топливного раствора (ИС выведены из АЗ)

Проведено прогнозирование критического объема при выведенных импульсных стерж-

нях из АЗ путем линейной аппроксимации зависимости обратного коэффициента умножения « $1000/Q$ » от количества топливного раствора, залитого в АЗ, к величине  $1000/Q = 0$ . Аппроксимация выполнена регрессионным анализом по МНК (рис. 2). Получена следующая зависимость:

$$1000/Q = -20,1V_{AZ} + 2181,7,$$

где  $1000/Q$  – обратный коэффициент умножения;  $V_{AZ}$  – объем АЗ, л. Прогнозируемый критический объем при выведенных из АЗ ИС составил 108,5 л.

После достижения критического состояния на запаздывающих нейтронах реактор выводился на установившийся период разгона. Информация о мощности реактора в ходе развития процесса автоматически записывалась в файл протокола СУЗ ИГРИК-2. Установившийся период разгона определялся в результате обработки зависимости показаний для токовых каналов измерения мощности реактора от времени, зафиксированного в файле протокола. Расчет реактивности, соответствующей периоду разгона, проводился по уравнению «обратных часов» с использованием констант (постоянные распада  $\lambda_i$  и относительные выходы  $\alpha_i$ ) [1]. Полученные результаты: объем АЗ при выходе на установившийся период, период разгона, реактивность – представлены в табл. 1.

Таблица 1

*Объем АЗ при выходе на установившийся период, период разгона, реактивность*

Номер пуска	Объем раствора в АЗ $V_{AZ}$ , л	Установившийся период разгона $\tau$ , с	Реактивность, соответствующая установившемуся периоду разгона $\tau$ , $\beta_{эф}$
1	109,05	38	0,192
	109,23	20	0,279
2	108,84	72	0,124
	109,11	29	0,226

Определено значение эффективности порции топливного раствора вблизи критического

состояния на запаздывающих нейтронах с выведенными из АЗ ИС и определение критического объема АЗ по периодам разгона путем линейной аппроксимации зависимости реактивности от объема АЗ. График линейной аппроксимации, полученной регрессионным анализом по методу наименьших квадратов, представлен на рис. 3.

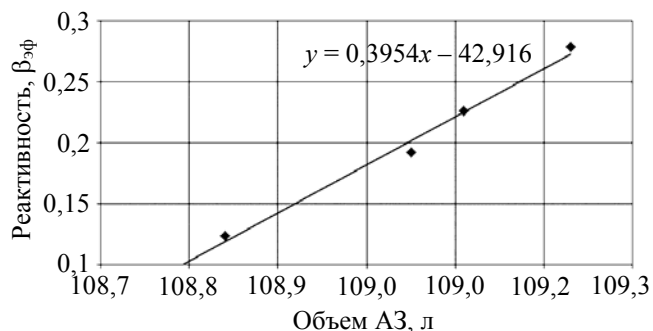


Рис. 3. График линейной аппроксимации реактивности от объема АЗ (ИС выведены из АЗ)

Получена следующая зависимость:

$$\rho = 0,3954V_{AZ} - 42,916,$$

где  $\rho$  – реактивность,  $\beta_{эф}$ ;  $V_{AZ}$  – объем АЗ, л. Значение критического объема АЗ, определенное по периоду разгона, соответствует полученному методом обратного умножения и составляет 108,5 л.

Значение эффективности порции топливного раствора с выведенными из АЗ ИС вблизи критического состояния на запаздывающих нейтронах составило  $d\rho/dV = 0,4 \beta_{эф}/л$ .

Определение критического объема АЗ и оценка эффективности порции топливного

раствора с введенными в АЗ импульсными стержнями ИС1–ИС6 проводились аналогичным образом. В результате получены следующие данные. Значение критического объема АЗ, определенное по периоду разгона, составляет 126,3 л. Значение эффективности порции топливного раствора вблизи критического состояния на запаздывающих нейтронах составило  $d\rho/dV = 0,53 \beta_{эф}/л$ .

Критический объем ТР с открытым окном биологической защиты составил 111,0 л.

### Проверка воспроизводимости критического состояния на запаздывающих нейтронах

Проверка воспроизводимости критического состояния осуществлялась путем определения невязки значений  $(\Delta V_{кр}^{\tau})$ , определяемых из измерений на периоде разгона,

$$V_{кр}^{\tau} = V_{AZ}^{\tau} - \frac{\rho_{\tau}}{\left(\frac{d\rho}{dV}\right)},$$

где  $V_{AZ}^{\tau}$  – объем топливного раствора в АЗ, соответствующий разгону с установившимся периодом разгона  $\tau$ , (л);  $\rho_{\tau}$  – реактивность, соответствующая установившемуся периоду разгона  $\tau$ , ( $\beta_{эф}$ );  $\frac{d\rho}{dV} = 0,4 \frac{\beta_{эф}}{л}$  – коэффициент «по доливанью». Результаты представлены в табл. 2. Конфигурация активной зоны: импульсные стержни выведены из АЗ, окно защиты открыто.

Таблица 2

#### Результаты проверки повторяемости критического состояния

Параметры реактора	Номер пуска				
	1	2	3	4	5
$V_{AZ}^{\tau}$ , л	111,26	111,26	111,26	111,43	111,42
$\tau$ , с	60	43	64	45	40
$\rho_{\tau}$ , $\beta_{эф}$	0,14	0,18	0,13	0,17	0,19
$V_{кр}^{\tau}$ , л	110,91	110,81	110,94	111,01	110,95
$\max(V_{кр}^{\tau})$ , л	0,1				

Из данных табл. 2 следует, что воспроизводимость критического состояния находится на уровне 0,1 л. Это соответствует изменению уровня раствора в АЗ ~1 мм при номинальной высоте ТР в корпусе ~70 см.

### Определение квазистатического коэффициента гашения реактивности

Определение квазистатического коэффициента гашения реактивности состоит в следующем:

– реактор выводится на установившийся период разгона;

– проводится контроль за изменением мощности (рост и затем снижение за счет отрицательной обратной связи по энерговыделению) по штатным токовым каналам контроля потока нейтронов (при этом информация автоматически записывается в файл протокола сеанса работы);

– выполняется обработка результатов измерений по алгоритму, реализующему решение обращенных уравнений кинетики, в результате обработки определяется зависимость изменения реактивности от энерговыделения и затем квазистатический коэффициент гашения реактивности.

Результаты работы представлены в табл. 3.

Таблица 3

#### Результаты определения квазистатического коэффициента гашения реактивности

Параметр	Номер пуска	
	3	5
$\gamma, \beta_{эф}/\text{МДж}$	-0,10	-0,10
$\langle \gamma \rangle \pm \Delta\gamma, \beta_{эф}/\text{МДж}$	-0,10 ± 0,02	

### Определение температурного коэффициента реактивности

Методика определения температурного коэффициента реактивности (ТКР) заключается в определении изменений критических

объемов и температуры при работе реактора на мощности. ТКР рассчитывается по формуле

$$\gamma_t = - \frac{(V_{АЗ}^к - V_{АЗ}^н) \frac{\partial \rho}{\partial V}}{\Delta t}$$

Контроль температуры осуществлялся на сливном трубопроводе корпуса активной зоны. Результаты показаны в табл. 4.

Таблица 4

#### Результаты оценки температурного коэффициента реактивности

Условия оценки	4-й пуск
Начальный критический объем $V_{АЗ}^н, \text{ л}$	111,1
Конечный критический объем $V_{АЗ}^к, \text{ л}$	118,6
Подогрев раствора $\Delta t, \text{ }^\circ\text{C}$	55 ± 3
$\gamma_t > \Delta\gamma_t, \beta_{эф}/\text{ }^\circ\text{C}$	-0,055 ± 0,004

### Проверка работоспособности реактора в стационарном режиме на мощности

Для проверки работоспособности реактора ИГРИК-2 в стационарном режиме на этапе физического пуска были проведены пуски. Конфигурация активной зоны: импульсные стержни выведены из АЗ, окно защиты открыто. В табл. 5 даны основные сведения о параметрах статических пусков реактора.

В целом реактор показал свою работоспособность в стационарном режиме, что подтверждается проведенными работами и полученными в них результатами. Наиболее показателен в этом плане статический пуск № 4 с максимальным временем работы и энерговыделением (график изменения мощности показан на рис. 4). В этом пуске в целях экспериментального определения пределов безопасной эксплуатации планировалось достичь предельных значений давления газа над зеркалом ТР (0,5 МПа) или температуры на сливном трубопроводе (70 °С).

## Основные параметры статических пусков

Параметр пуска	Номер пуска				
	1	2	3	4	5
Критический объем, л	111,0	111,0	111,0	111,1	111,0
Максимальная мощность, кВт	2	12	10	36	39
Энерговыведение, МДж	2,2	<0,5	7,5	81	4,8
Начальная температура ТР, °С	13	14	14	15	15
Конечная температура ТР, °С	20	16	23	70	22

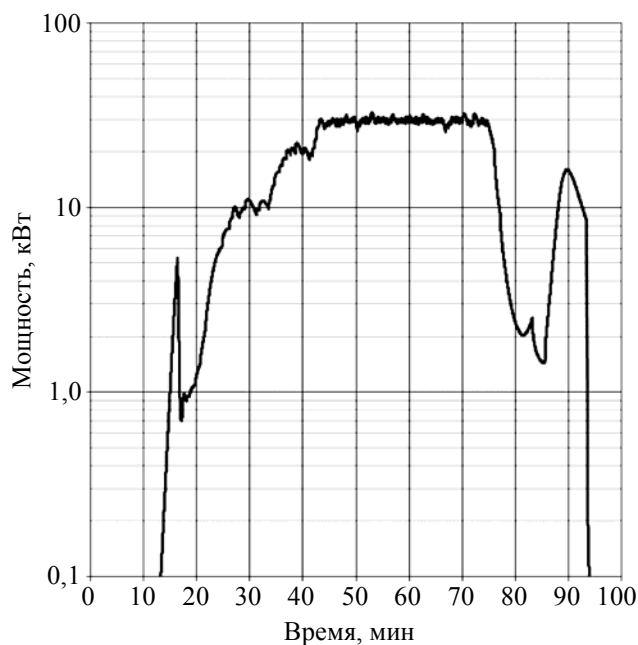


Рис. 4. График изменения мощности в статическом пуске № 4

Как следует из данных табл. 5, предельному значению температуры на сливном трубопроводе 70 °С соответствует энерговыведение 81 МДж, предельного значения по давлению достичь не удалось. На рис. 5 показан график зависимости давления от энерговыведения, который иллюстрирует приблизительно линейный характер зависимости с коэффициентом  $\sim 3,6$  кПа/МДж. Таким образом, заданному в качестве предельного значения давлению газа над зеркалом топливного раствора 0,5 МПа соответствует энерговыведение 139 МДж. График зависимости подогрева топливного раствора от энерговыведения представлен на рис. 6.

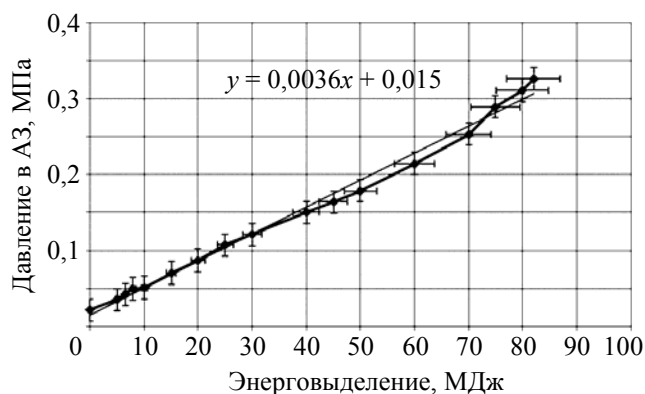


Рис. 5. График зависимости давления над зеркалом ТР от энерговыведения

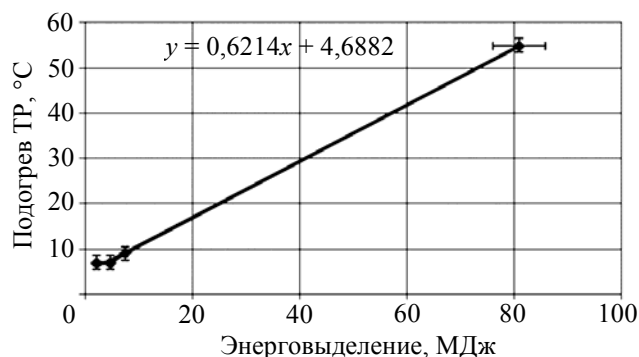


Рис. 6. График зависимости подогрева ТР от энерговыведения

Одной из задач проверки работоспособности являлось определение возможности удержания мощности на заданном уровне. Для реактора ИГРИК-2 это актуально ввиду отсутствия органов точного регулирования реактивности – управление реактивностью осуществляется путем регулирования уровня ТР в корпусе активной зоны. На рис. 7 показан график изменения мощности при удержании

ее значения на уровне 30 кВт. Из графика видно, что подача/слив ТР в/из корпус(а) производится малыми порциями, вызывающими малое, но достаточное для удержания мощности изменение реактивности.

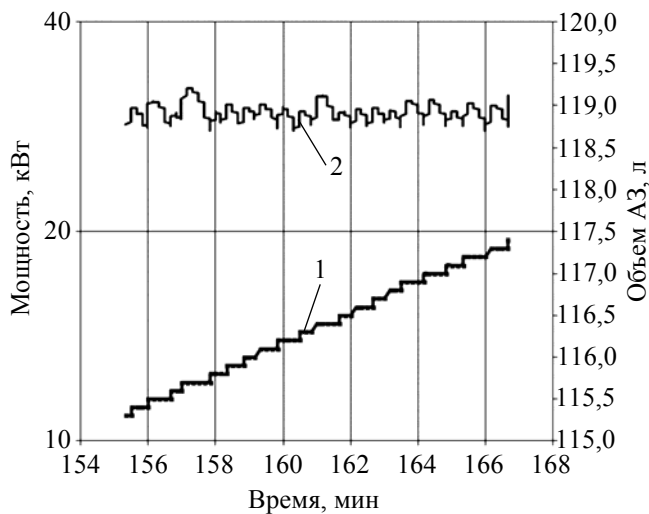


Рис. 7. График изменения мощности при подаче топливного раствора (1 – объем АЗ, 2 – мощность)

## Заключение

В ходе выполненных работ по физическому пуску в стационарном режиме работы на реакторе ИГРИК-2 получены следующие основные результаты:

1. Определены параметры критической конфигурации реактора ИГРИК-2: критический объем для конфигурации с выведенными из АЗ ИС – 108,5 л, критический объем для конфигурации с введенными в АЗ ИС – 126,3 л, что соответствует ранее теоретически обоснованным значениям.

2. Экспериментально подтверждена воспроизводимость критического состояния на уровне  $\pm 0,1$  л.

3. Полученные экспериментальные значения квазистатического коэффициента гашения и температурного коэффициента реактивности находятся в согласии с расчетными:  $\gamma \approx -0,1 \beta_{эф}/\text{МДж}$  и  $\Delta\gamma_t \approx -0,055 \beta_{эф}/^\circ\text{C}$ .

4. Установлены взаимосвязи между температурой топливного раствора при его сливе, давлением газа над зеркалом топливного раствора и энерговыделением. Обосновано значение предельного энерговыделения в стационарном режиме работы 80 МДж, обеспечивающее непревышение изначально рекомендованных «Программой физического пуска...» предельно допустимых параметров (давление – не более 0,5 МПа, температура – не более 70 °С).

5. Подтверждена работоспособность реактора в статическом режиме работы на мощности до 40 кВт: показана возможность регулирования и удержания мощности на заданном уровне при управлении реактивностью путем регулирования количества топливного раствора в корпусе активной зоны.

## Список литературы

1. Кипин Дж. Р. Физические основы кинетики ядерных реакторов. М.: Атомиздат, 1967.

Контактная информация –

Манаков Андрей Александрович,  
инженер-исследователь 2 кат.,  
РФЯЦ-ВНИИТФ,  
e-mail: dep5@vniitf.ru

Статья поступила в редакцию 20.06.18.

Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика ядерных реакторов, 2018, вып. 4, с. 62–68.