

## ПЕРСПЕКТИВНЫЙ РАСТВОРНЫЙ ИМПУЛЬСНЫЙ РЕАКТОР: НЕЙТРОННО-ФИЗИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И ОБЛУЧАТЕЛЬНЫЕ ПАРАМЕТРЫ

А. Д. Авдеев, Л. С. Богомоллова, В. Ю. Волгутов, Л. Ю. Глухов, В. Б. Гречушкин,  
А. А. Девяткин, А. Р. Дягель, К. Б. Жогова, А. А. Кубасов, Н. И. Москвин, А. А. Пикулев,  
К. Г. Плужан, А. Н. Сизов, С. О. Табаков, С. Л. Турутин, В. Х. Хоружий, Н. А. Шлячков,  
А. В. Шуркаев, Д. А. Юнин

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ, г. Саров Нижегородской обл.

Статья поступила в редакцию 29.07.2021, после доработки – 16.09.2021, принята к публикации – 18.11.2021

В статье представлены предложения по облику перспективного растворного импульсного ядерного реактора, который планируется в качестве замены реактора ВИР-2М, эксплуатируемого в настоящее время в РФЯЦ-ВНИИЭФ. Показано, что расчетные облучательные параметры перспективного реактора в ~2 раза превосходят облучательные параметры действующего реактора ВИР-2М.

**Ключевые слова:** аperiодический импульсный реактор, нейтронно-физический расчет, активная зона, органы регулирования реактивности, система каталитической рекомбинации.

**ADVANCED SOLUTION-TYPE PULSED REACTOR: NEUTRON-PHYSICS CHARACTERISTICS AND IRRADIATION PARAMETERS / A. D. Avdeev, L. S. Bogomolova, V. Yu. Volgutov, L. Yu. Glukhov, V. B. Grechushkin, A. A. Devyatkin, A. R. Dyagel', K. B. Zhogova, A. A. Kubasov, N. I. Moskvina, A. A. Pikulev, K. G. Pluzyan, A. N. Sizov, S. O. Tabakov, S. L. Turutin, V. Kh. Khoruzhy, N. A. Shlyachkov, A. V. Shurkaev, D. A. Yunin** // In the article there are presented the proposals concerning the aspect of the advanced solution-type pulsed reactor planned to replace the VIR-2M reactor operating today in RFNC-VNIIEF. It is demonstrated that the calculated irradiation parameters of the advanced reactor are ~2 times higher than the radiation parameters of the operating VIR-2M reactor.

**Key words:** aperiodic pulsed reactor, neutron-physics calculation, core, reactivity regulating elements, catalytic recombination system.

### Введение

В настоящее время во ВНИИЭФ эксплуатируется аperiодический импульсный ядерный реактор (ИЯР) ВИР-2М (четвертая модификация реакторов типа ВИР) растворной разновидности импульсных реакторов самогасящегося действия, предназначенных для проведения разнообразных физических экспериментов. ИЯР ВИР-2М является одной из наиболее

востребованных ядерно-физических установок ВНИИЭФ и интенсивно используется для проведения испытаний радиационной стойкости аппаратуры, приборов, оборудования, изделий электронной техники, квантовой электроники и электротехнических устройств военного назначения, а также для исследований радиационной стойкости различных материалов и изделий при проведении разнообразных физических экспериментов [1–7].

ВИР-2М – импульсный реактор с растворной активной зоной (АЗ), в котором в качестве топлива используется раствор уранилсульфата высокообогащенного урана (90 % по  $^{235}\text{U}$ ) в воде. Топливный раствор (ТР) залит в прочный цилиндрический герметичный корпус из нержавеющей стали 12Х18Н10Т (высота – 2 м, диаметр – 0,68 м, толщина стенок – 65 мм). В днище корпуса выполнен полусферический канал (ПСК) внутренним диаметром 300 мм. К крышке корпуса приварен центральный канал (ЦК) с внутренним диаметром 142 мм и шесть каналов для размещения стержней управления (поглощающие стержни из гидрида лития), расположенных равномерно по окружности диаметром 360 мм.

Управление реактором осуществляется с помощью 6 стержней управления реактивностью (СУР) из гидрида лития. Два регулирующих стержня, РС-1 и РС-2, могут независимо перемещаться только электромеханическими приводами. Два блока импульсных стержней ИС-1 и ИС-2 (по два стержня в блоке) перемещаются с помощью универсальных приводов, позволяющих использовать эти СУР или как регулирующие, или как импульсные.

Вертикальный разрез корпуса АЗ реактора ВИР-2М представлен на рис. 1.

В связи с появлением новых задач по проведению испытаний на радиационную стойкость различных материалов, радиоэлектронных изделий и приборов, а также повышенными требованиями к режимам, уровням и условиям облучения испытываемых объектов, появилась необходимость модернизации ИЯР ВИР-2М для повышения его эксплуатационных характеристик и облучательных возможностей.

На модернизированном ИЯР ВИР-2М (далее – ИЯР ВИР-3) будут реализованы следующие новые технические решения:

- применение нового корпуса АЗ, в котором предусмотрен сквозной центральный экспериментальный канал (СЦК) с максимальным внутренним диаметром 400 мм;

- введение в состав ИЯР системы каталитической рекомбинации (СКР), позволяющей

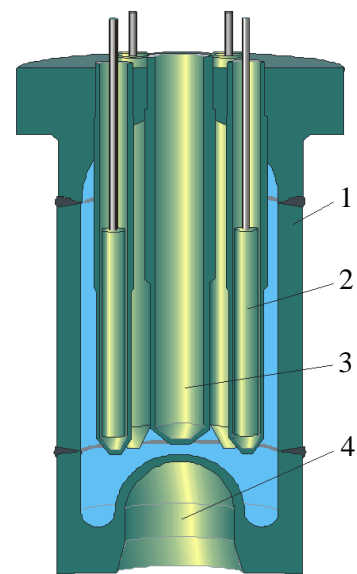


Рис. 1. Вертикальный разрез корпуса АЗ реактора ВИР-2М: 1 – корпус АЗ; 2 – СУР (6 шт.); 3 – ЦК; 4 – ПСК

утилизировать радиолитические водород и кислород при работе реактора в статическом режиме;

- использование двухконтурной системы охлаждения АЗ с замкнутым вторым контуром;

- реализация нестандартных режимов работы (квазиимпульсный режим, генерация импульса при работе реактора на статической мощности, генерация серии импульсов), которые в полной мере не могут быть реализованы на ИЯР ВИР-2М.

Модернизация ИЯР ВИР-2М позволит расширить возможности проведения опытов на радиационную стойкость, поскольку при работе ИЯР ВИР-3 в импульсном режиме уровни нейтронного и гамма-излучения в экспериментальном канале по сравнению с реактором ВИР-2М будут повышены в ~2 раза.

### Структура и состав активной зоны

В целях решения задачи по организации в корпусе АЗ ИЯР ВИР-3 сквозного экспериментального канала и повышения облучательных параметров был проведен широкий спектр оптимизационных расчетов нейтронно-физических характеристик (НФХ) реактора. Всего было рассмотрено 9 различных конфи-

гураций корпуса реактора ВИР-3 и, в результате, выбрана конфигурация корпуса АЗ, которая позволяет достичь наиболее высоких облучательных параметров (рис. 2).

В табл. 1 приведено сравнение нейтронно-физических характеристик ИЯР ВИР-2М (экспериментальные данные) с расчетными НФХ ИЯР ВИР-3 с оптимизированной АЗ.

Из табл. 1 видно, что основные облучательные параметры ИЯР ВИР-3 существенно превышают параметры ИЯР ВИР-2М:

– увеличен объем экспериментального канала – верхний центральный канал (ВЦК)  $\varnothing 20$  см (по сравнению с ЦК  $\varnothing 14,2$  см) и нижний центральный канал (НЦК)  $\varnothing 40 \times 50$  см (по сравнению с ПСК  $\varnothing 30$  см);

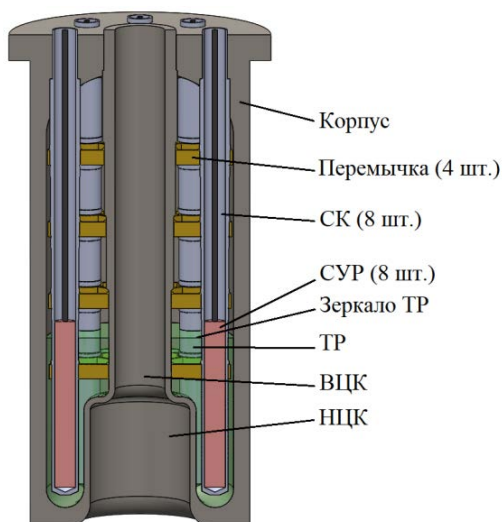


Рис. 2. Вертикальный разрез корпуса АЗ ИЯР ВИР-3

Таблица 1

Сравнение НФХ ИЯР ВИР-3 и ВИР-2М

Параметр	Значение	
	ВИР-3	ВИР-2М
Габаритные размеры корпуса, см	$\varnothing 88 \times 200$	$\varnothing 68 \times 200$
Материал корпуса	Сталь 12Х18Н10Т	
Диаметр облучательных каналов, см	$\varnothing 20$ (ВЦК) $\varnothing 40 \times 50$ (НЦК)	$\varnothing 14,2$ (ЦК) $\varnothing 30$ (ПСК)
Рабочий объем топливного раствора, л	163,9	104,8
Концентрация урана в топливе, г/л	56	$67 \pm 1$
Масса урана в растворе, кг	9,18	7,02
Количество стержней регулирования, шт.	8	6
Состав поглотителя в стержнях регулирования	Гидрид лития	
Вес стержней	$10,34 \beta_{эф}$	$11,5 \pm 0,1 \beta_{эф}$
Реактивность в заглушенном состоянии	$-3,88 \beta_{эф}$	$-5,3 \beta_{эф}$
Температурный коэффициент гашения, $\partial k/\partial T, K^{-1}$	$2,33 \cdot 10^{-4}$	$3,2 \cdot 10^{-4}$
Доля нейтронов с энергией выше 0,1 МэВ, %	55	52,3
<b>Импульсный режим</b>		
Максимальное энерговыделение в импульсе, МДж	152	59,7
Полуширина импульса, мс	3,0	2,7
Реактивность в импульсном режиме	$6,77 \beta_{эф}$	$6,2 \pm 0,1 \beta_{эф}$
Максимальный флюенс нейтронов за импульс, $см^{-2}$	$1,36 \cdot 10^{15}$ (ВЦК)	$7,2 \cdot 10^{14}$ (ЦК)
	$1,21 \cdot 10^{15}$ (НЦК)	$7,2 \cdot 10^{14}$ (ПСК)
Максимальная доза мгновенного гамма-излучения за импульс, Гр	$9,82 \cdot 10^3$ (ВЦК)	$4,2 \cdot 10^3$ (ЦК)
	$8,27 \cdot 10^3$ (НЦК)	$3,8 \cdot 10^3$ (ПСК)
<b>Статический режим</b>		
Максимальная мощность в статическом режиме, кВт	100	80
Максимальная мощность в длительной статике, кВт	20	12
Максимальная плотность потока нейтронов в длительном статическом режиме, $см^{-2} \cdot с^{-1}$	$1,3 \cdot 10^{11}$ (ВЦК)	$10^{11}$
	$1,2 \cdot 10^{11}$ (НЦК)	(полюс ПСК)

– в 2,5 раза увеличено энерговыделение в импульсном режиме, с 60 до 150 МДж;

– при работе ИЯР в импульсном режиме в  $\sim 2$  раза повышены уровни излучения:

1) флюенс нейтронов – с  $7,2 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$  (ЦК ВИР-2М) до  $1,36 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$  (ВЦК ВИР-3);

2) доза мгновенного гамма-излучения – с  $4,2 \cdot 10^3 \text{ Гр}$  (ЦК) до  $9,82 \cdot 10^3 \text{ Гр}$  (ВЦК);

– на 30 % увеличена плотность потока нейтронов в экспериментальном канале при работе реактора в длительном статическом режиме (с  $10^{11}$  до  $1,3 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$ ).

### Органы регулирования реактивности

Параллельно с работами по оптимизации корпуса АЗ проведен большой цикл оптимизационных расчетов по определению конструкции и состава поглощающих стержней органов регулирования реактивности (ОРР) ВИР-3. В результате были определены основные параметры стержней ОРР ИЯР ВИР-3:

– количество стержней ОРР – 8 шт.;

– состав поглотителя в стержнях регулирования – гидрид лития;

– суммарный «вес» стержней –  $10,34\beta_{\text{эф}}$ ;

– осевое расстояние между стержнями – 600 мм;

– конструкция поглощающих стержней (и стержневых каналов) идентична стержням ИЯР ВИР-2М; эффективная рабочая высота стержней увеличена (622 мм) по сравнению с ИЯР ВИР-2М (541 мм).

Для определения необходимого количества стержней ОРР, обеспечивающих функции регулирующих ОРР и аварийной защиты, были проведены расчеты коэффициента размножения АЗ ИЯР ВИР-3 при последовательном извлечении стержней и исследованы эффекты интерференции стержней. Результаты проведенных расчетов показали следующее:

– «вес» стержня принимает максимальное значение в том случае, когда остальные стержни введены в АЗ. При извлечении стержней из АЗ «вес» стержня монотонно снижа-

ется с увеличением количества извлеченных стержней;

– суммарный «вес» пары стержней максимален для рядом расположенных стержней. Минимальный «вес» достигается для пар стержней, максимально удаленных друг от друга.

Функциональное назначение стержней ОРР ИЯР ВИР-3 (рис. 3):

– два соседних стержня, РС-1 и РС-2 (вариант: симметрично расположенных относительно оси корпуса), обеспечивают функции регулирующих ОРР и аварийной защиты. Они оборудуются электромеханическими приводами и электромагнитными муфтами, размыкающимися при срабатывании сигнала аварийной защиты или при нарушении электропитания СУЗ, в результате чего стержни под собственным весом падают в АЗ реактора;

– остальные 6 стержней (ИС-1–ИС-6) выполняют функцию импульсных и регулирующих ОРР. Они оборудуются быстродействующими механическими приводами, которые обеспечивают перемещение стержней ОРР во всем диапазоне скоростей, необходимом для реализации статического, импульсного и специальных режимов работы ИЯР ВИР-3.

Результаты расчета зависимости эффективного коэффициента размножения от высоты извлечения стержней ОРР из АЗ ИЯР ВИР-3 представлены на рис. 4.

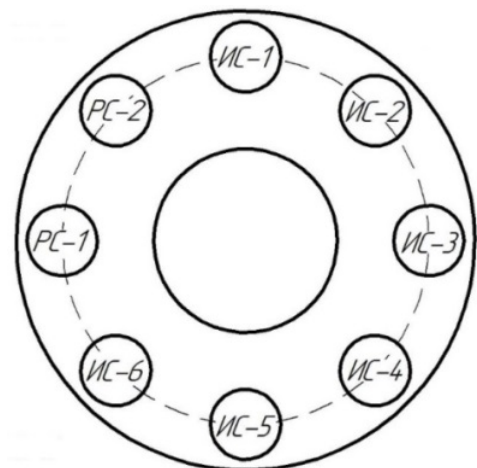


Рис. 3. Обозначение функционального назначения ОРР

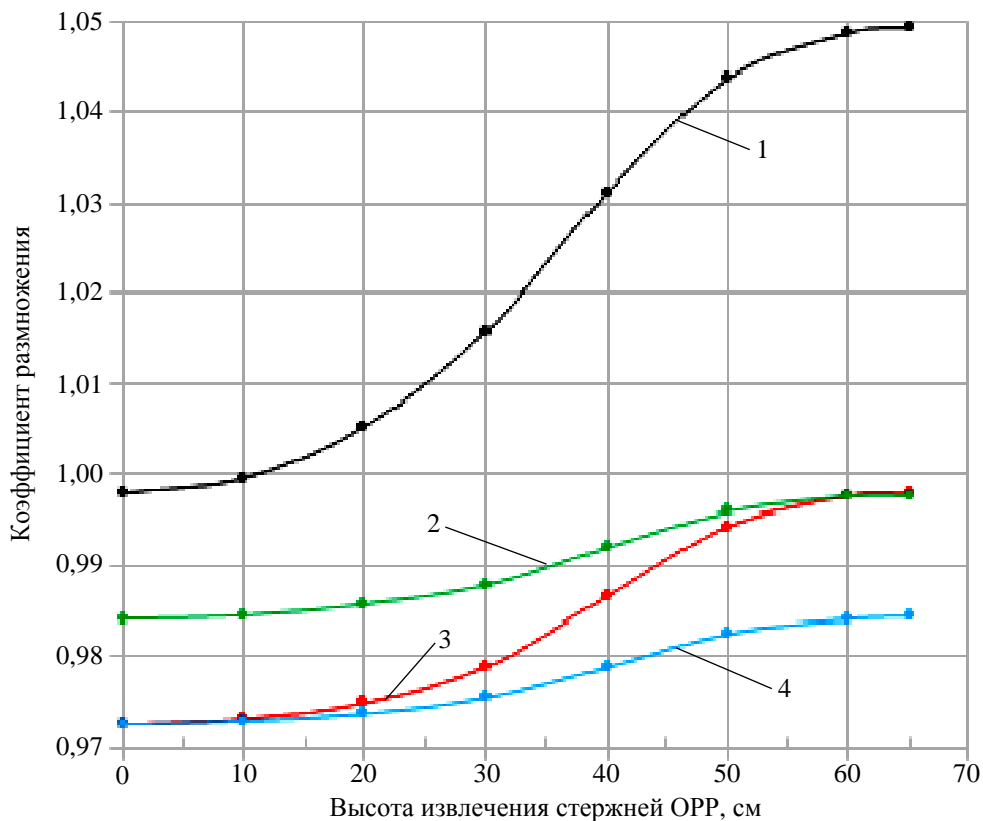


Рис. 4. Зависимость  $K_{эф}$  от высоты извлечения стержней ОРР: 1 – извлечение ИС-1–ИС-6. РС-1, РС-2 подняты; 2 – извлечение РС-1. РС-2 поднят, ИС-1–ИС-6 опущены; 3 – извлечение РС-1 и РС-2. ИС-1–ИС-6 опущены; 4 – извлечение РС-1. РС-2 и ИС-1–ИС-6 опущены

На ИЯР ВИР-3 предполагается реализовать следующие режимы работы:

- 1) импульсный;
- 2) статический;
- 3) специальные (квазиимпульсный режим, генерация серии из нескольких последовательных импульсов, генерация импульса при работе на статической мощности).

В зависимости от функционального назначения основных ОРР исполнительные механизмы (ИМ) ОРР ИЯР ВИР-3 делятся на два типа:

- ИМ САЗ – исполнительные механизмы стержней аварийной защиты (2 шт.);
- ИМ СРР – исполнительные механизмы стержней регулирования реактивности (6 шт.)

В целях подтверждения технических решений по конструкции приводов ИМ ОРР ИЯР ВИР-3 разработаны два макета:

- макет привода ИМ СРР тросовый (рис. 5);
- макет привода ИМ САЗ винтовой.

Для проведения испытаний макетов приводов разработан массогабаритный стенд. Эскиз стенда представлен на рис. 6.

Стенд позволяет отработать режимы работы приводов ИМ ОРР, оценить возможность использования привода во всем диапазоне требуемых скоростей. Алгоритмы работы приводов ИМ ОРР для реализации режимов работы ИЯР ВИР-3 изложены в табл. 2.

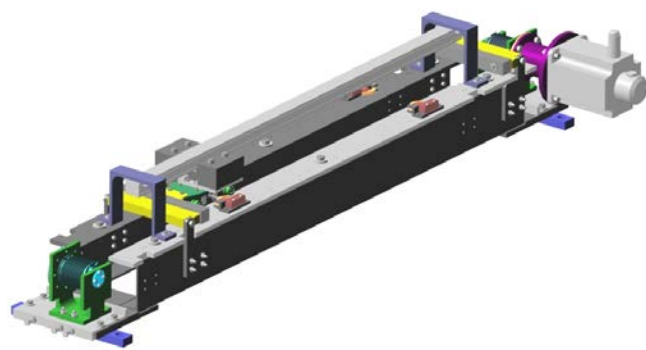


Рис. 5. Макет привода тросовый

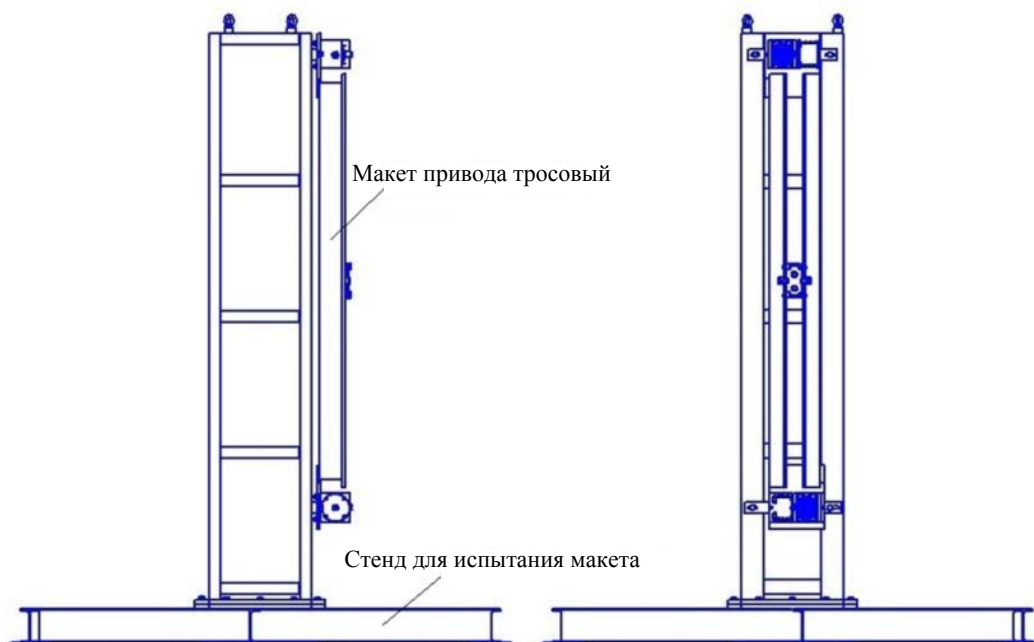


Рис. 6. Стенд для испытания макета привода тросового ИМ ОРР

Таблица 2

*Алгоритм работы приводов ИМ ОРР в различных режимах*

Режим работы	Количество и тип привода ИМ	Описание работы приводов
Импульсный на мгновенных нейтронах	2 САЗ, 1–6 СРР	САЗ перемещаются в положение, заданное оператором. СРР движутся одновременно, синхронно, неуправляемо
Статический	1–2 САЗ, 1–6 СРР	Приводы САЗ и/или СРР движутся поочередно, поддерживая период или мощность в заданном диапазоне; используется ручной или автоматический режим регулирования
Импульсный на запаздывающих нейтронах	2 САЗ, 1–6 СРР	САЗ перемещаются в положение, заданное оператором. СРР одновременно, по одному или группами стержней, по команде автоматического регулятора мощности (АРМ) извлекаются из АЗ согласно заданному алгоритму
Генерирование серии из нескольких последовательных импульсов	2 САЗ, 2–6 СРР	САЗ перемещаются в положение, заданное оператором. СРР по одному или группами стержней движутся последовательно друг за другом с задержкой 1–10 с, оставаясь в крайнем верхнем положении до команды на опускание
Генерирование импульса на мгновенных нейтронах при работе на статической мощности	2 САЗ, 1–6 СРР	При работе в статическом режиме приводы САЗ и/или СРР движутся поочередно, поддерживая период или мощность в заданном диапазоне; используется ручной или автоматический режим регулирования. При генерации импульса СРР движутся одновременно, синхронно, неуправляемо

## Система каталитической рекомбинации

В процессе работы реактора с растворным топливом под воздействием осколков деления происходит интенсивный радиолиз воды с образованием радиолитического водорода и кислорода [8]. На ИЯР ВИР-2М образующаяся водородно-кислородная смесь удаляется из корпуса реактора путем искрового воспламенения в камере поджига. При длительной работе ИЯР ВИР-2М в статическом режиме требуется неоднократное сжигание водородно-кислородной смеси. Однако это приводит к резкому падению мощности вследствие падения давления и вскипания топливного раствора.

Для устранения этого недостатка на ИЯР ВИР-3 предполагается использовать систему каталитической рекомбинации (СКР) с принудительной циркуляцией, предназначенную для непрерывного удаления радиолитического гремучего газа из корпуса АЗ при работе ИЯР

в статическом режиме. Схема газового тракта СКР ИЯР ВИР-3 представлена на рис. 7.

Проведенные теплогидравлические расчеты продемонстрировали возможность поддержания концентрации водорода во взрывобезопасных пределах. Для отработки предложенных технических решений разработан полномасштабный макет СКР, имитирующий работу реактора в статическом режиме на мощности 20 кВт.

## Система охлаждения и нагрева

Система охлаждения и нагрева (СОН) ИЯР ВИР-3 предназначена для охлаждения (нагрева) корпуса АЗ реактора и охлаждения элементов (холодильников) СКР. Первый контур СОН состоит из двух независимых петель:

- охлаждения–нагрева корпуса АЗ реактора (рис. 8);
- охлаждения СКР.

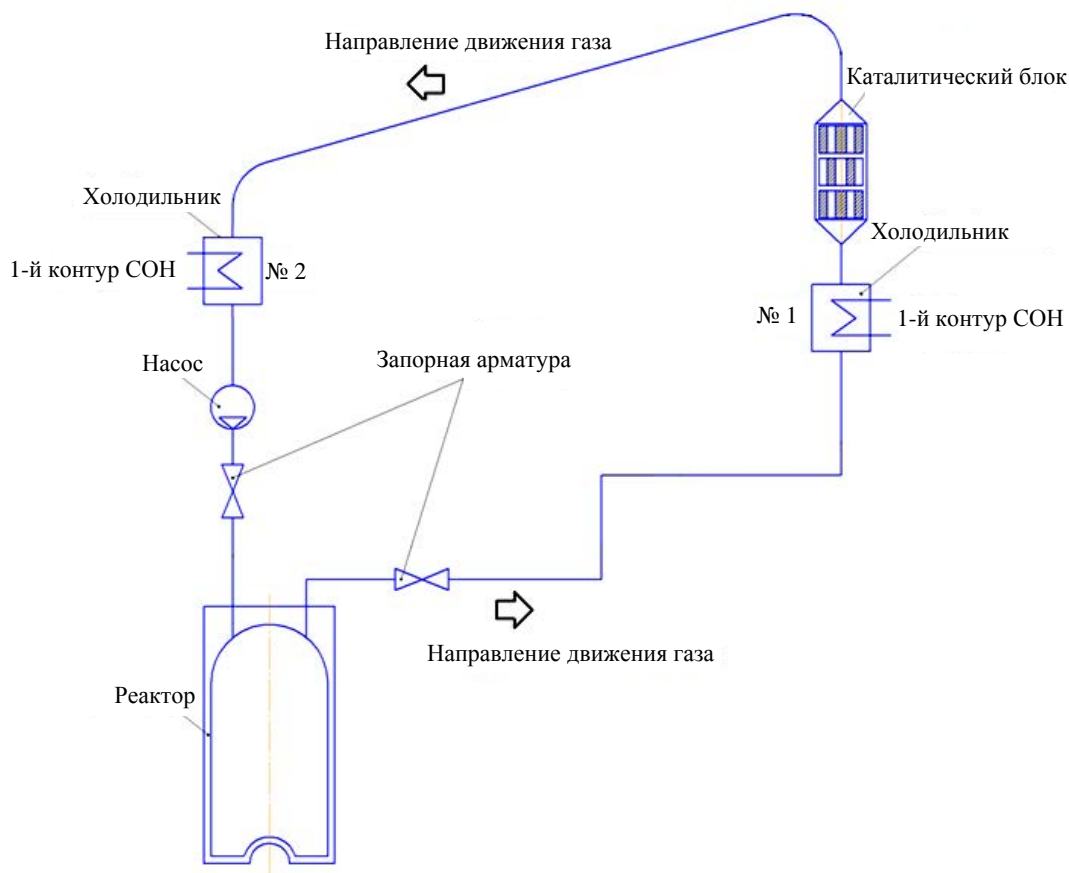


Рис. 7. Схема газового тракта СКР с принудительной циркуляцией

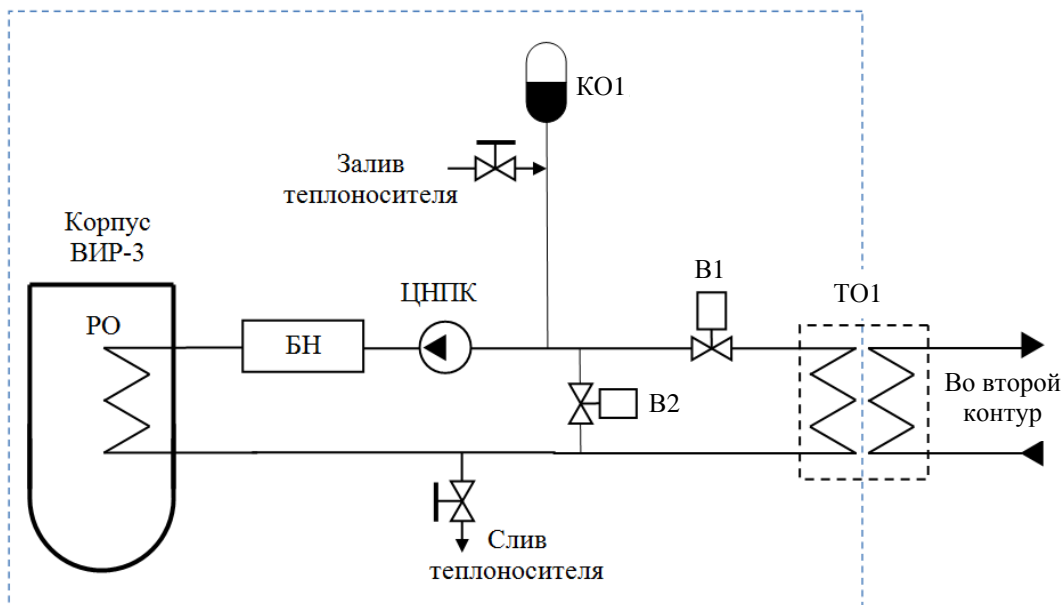


Рис. 8. Принципиальная схема петли охлаждения–нагрева корпуса АЗ: ЦНПК – циркуляционный насос первого контура; РО – рубашка охлаждения; КО1 – компенсатор изменения объема теплоносителя первого контура; В1 – вентиль контура охлаждения; В2 – вентиль контура нагрева; БН – блок нагрева; ТО1 – теплообменник

Охлаждение корпуса АЗ реактора осуществляется прокачкой теплоносителя через рубашку охлаждения (РО), расположенную снаружи корпуса реактора.

Тепловая мощность теплообменника 1-го контура СОН составляет 30 кВт.

Второй контур СОН обеспечивает:

– температуру теплоносителя первого контура на выходе из ТО1 (не более 15 °С);

– количество тепла, отбираемое от теплоносителя 1-го контура в ТО1 (не менее 30 кВт).

Теплообменник 2-го контура СОН (ТО2) представляет собой жидкостно-воздушный охладитель. Принципиальная схема второго контура СОН показана на рис. 9.

Проведенные расчеты показали, что СОН обеспечивает возможность длительной работы ИЯР ВИР-3 на статической мощности до 24 кВт.

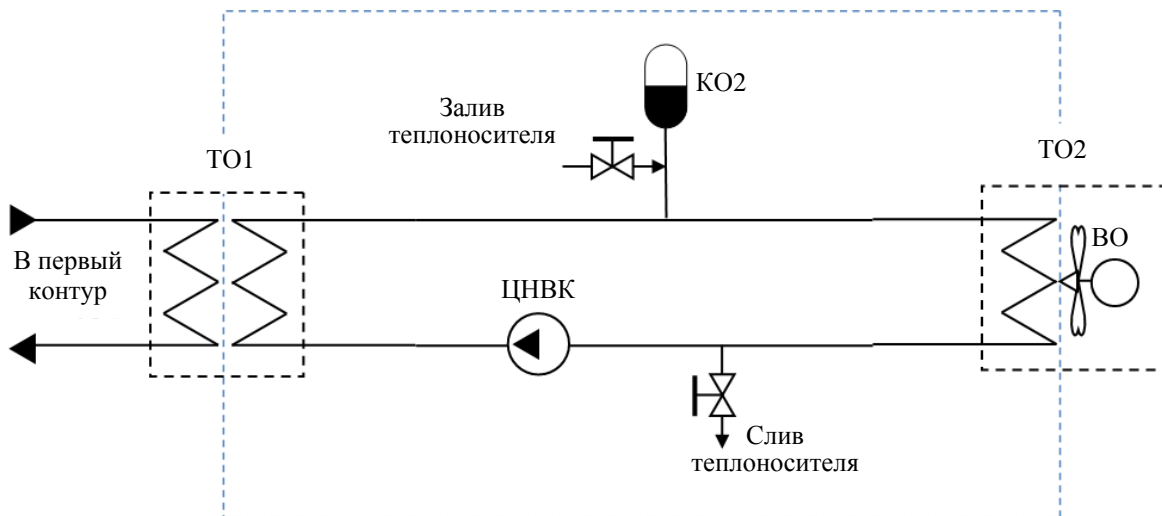


Рис. 9. Принципиальная схема второго контура СОН: ЦНПК – циркуляционный насос второго контура; ВО – вентилятор охлаждения; КО2 – компенсатор изменения объема теплоносителя второго контура



## Заключение

В работе представлены предложения по облику перспективного растворного импульсного реактора ВИР-3, который планируется в качестве замены эксплуатирующегося в настоящее время ИЯР ВИР-2М. Основными особенностями ИЯР ВИР-3 являются:

– сквозной экспериментальный канал с максимальным диаметром  $\varnothing$  400 мм;

– универсальные электромеханические приводы органов регулирования реактивности, обеспечивающие как стандартные, так и специальные режимы работы ИЯР;

– система каталитической рекомбинации с принудительной прокачкой парогазовой смеси, предназначенная для непрерывной утилизации радиолитического газа при работе ИЯР ВИР-3 в статическом режиме;

– двухконтурная система охлаждения и нагрева.

Показано, что расчетные облучательные параметры ИЯР ВИР-3 в импульсном режиме работы в  $\sim 2$  раза превосходят облучательные параметры действующего ИЯР ВИР-2М.

## Список литературы

1. Воинов А. М., Колесов В. Ф., Матвеевко А. С. и др. Водный импульсный реактор ВИР-2М и его предшественники // ВАНТ. Сер. Физика ядерных реакторов. 1990. Вып. 3. С. 3–15.

2. Воинов А. М., Довбыш Л. Е., Кривоносов В. Н. и др. Экспериментальный комплекс на основе реактора ВИР-2М для исследования лазеров с ядерной накачкой // ВАНТ. Сер. Физика ядерных реакторов. 2000. Вып. 3. С. 64–48.

3. Харитон Ю. Б., Воинов А. М., Колесов В. Ф. и др. Аперриодические исследовательские импульсные реакторы / Вопросы современной экспериментальной и теоретической физики. – Ленинград: Наука, 1984. С. 103–119.

4. Khariton Yu. B., Voinov A. M., Kolesov V. F. et al. Overview of VNIIEF Pulsed Reactors // Proc. Of the International Topical Meeting on physics, safety and applications of pulse reactors held at Washington, D.C., November 13–17, 1994. P. 22–24.

5. Харитон Ю. Б., Воинов А. М., Колесов В. Ф. и др. Импульсные реакторы ВНИИЭФ (обзор) // ВАНТ. Сер. Физика ядерных реакторов. 1996. Вып. 2. С. 3–12.

6. Колесов В. Ф. Аперриодические импульсные реакторы: Монография в 2 т. – Саратов: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2007. Т. 1. С. 149–156.

7. Лукин. А. В. Физика импульсных ядерных реакторов. – Снежинск: Изд-во РФЯЦ-ВНИИТФ, 2006. С. 107–109.

8. Бяков В. М., Ничипоров Ф. Г. Радиолиз воды в ядерных реакторах. – Москва: Энергоатомиздат, 1990. 176 с.

Контактная информация –

Дягель Антон Русланович,  
инженер по испытаниям ИЯРФ,  
РФЯЦ-ВНИИЭФ,  
e-mail: otd4@exped.vniief.ru

Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика ядерных реакторов, 2021, вып. 4, с. 56–64.