

## РАЗРАБОТКА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО КОМПЛЕКСА ДИСТАНЦИОННОГО КОНТРОЛЯ И УПРАВЛЕНИЯ ПОЛНОМАСШТАБНОГО МАКЕТА СИСТЕМЫ КАТАЛИТИЧЕСКОЙ РЕКОМБИНАЦИИ РАСТВОРНОГО ЯДЕРНОГО РЕАКТОРА

И. А. Сеницын<sup>1</sup>, Д. А. Юнин<sup>2</sup>, А. А. Кубасов<sup>2</sup>, А. Р. Дягель<sup>2</sup>

<sup>1</sup>СарФТИ НИЯУ МИФИ, г. Саров Нижегородской обл.

<sup>2</sup>ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

Статья поступила в редакцию 08.07.2022, после доработки – 15.07.2022, принята к публикации – 20.09.2022

В статье представлены результаты разработки программы управления макетом системы каталитической рекомбинации (СКР) гремучего газа, образующегося в надтопливном пространстве во время работы растворного исследовательского ядерного реактора ВИР-2М. Для макета СКР определен облик измерительно-управляющей системы, а также осуществлен подбор измерительно-управляющего оборудования. В статье представлены условия работоспособности полномасштабного макета СКР, которые определены исходя из параметров работоспособности при работе в статическом режиме на мощности до 30 кВт.

**Ключевые слова:** растворный ядерный реактор, радиолиз воды, система каталитической рекомбинации, измерительная система, аварийные и предупредительные уставки.

**Development of the automated complex of remote control and management of the full-scale model of system of the catalytic recombination solution nuclear reactor. I. A. Sinitsin<sup>1</sup>, D. A. Yunin<sup>2</sup>, A. A. Kubasov<sup>2</sup>, A. R. Dyagel<sup>2</sup>** (<sup>1</sup>*SARFTI NIYAU of MEFPhI, Sarov, Nizhni Novgorod region;* <sup>2</sup>*FSUE «RFNC-VNIIEF», Sarov, Nizhni Novgorod region*). In the report there are presented the results of developing the program to control the breadboard of detonating gas catalytic recombination system (CRS), the detonating gas being formed in above-fuel space during operation of solution-type nuclear research reactor VIR-2M. For the CRS breadboard the general aspect of measurement and control system is defined and the selection of measurement and control equipment is made. The paper presents operability conditions of the full-scale CRS breadboard that are defined on the base of operability parameters at working in a static mode at a power up to 30 kW.

**Keywords:** solution-type nuclear reactor, water radiolysis, catalytic recombination system, measurement system, emergency and precautionary settings.

DOI 10.53403/02054671\_2022\_3\_72

### Введение

Одним из наиболее простых по конструкции аperiodических импульсных реакторов (АИР) является реактор с активной зоной (АЗ) из водного раствора солей урана в обычной воде. Первые АИР этого типа –

реакторы KEWB – были запущены в США и использовались в исследованиях, тесно связанных с изучением безопасности. Конструкция современного растворного АИР включает в себя сосуд цилиндрической формы с прочными стенками, заполненный до некоторой высоты топливным раство-

ром. В качестве топлива обычно используют растворы уранилсульфата, уранилнитрата или флюорида урана. Эти растворы отличаются хорошей химической стабильностью. Масса делящегося материала в АЗ и объем раствора зависят от концентрации последнего и геометрии сосуда и равны, соответственно, 5–8 кг и 30–120 л. Реактивность регулируют стержнями, содержащими поглотители нейтронов. Генерирование импульса производят путем быстрого вывода из АЗ одного или группы импульсных стержней. Строительство первого во ВНИИЭФ (Россия) АИР на растворном топливе, получившего название ВИР-1, было завершено в 1964 г. В последующие годы во ВНИИЭФ были построены три других типа реактора семейства ВИР, поочередно заменившие друг друга. Реакторы семейства ВИР отличаются друг от друга элементами конструкции, концентрацией топливного раствора и схемой размещения в реакторном здании [1].

Специфической особенностью реакторов серии ВИР является необходимость периодического сжигания гремучего газа (ГГ) при работе на мощности в статическом режиме (при работе в импульсном режиме сжигание ГГ производится через некоторое время после проведения пуска и не затрагивает работу реактора на мощности). Для сжигания служит специальный газовый контур. Сжигание ГГ на реакторе ВИР-2М осуществляется путем временного подключения к газовому объему корпуса АЗ специальной камеры воспламенения объемом 3 дм<sup>3</sup>, снабженной искровыми электросвечами; вода, образующаяся при сжигании ГГ, возвращается обратно в топливный раствор, находящийся в корпусе реактора. При воспламенении ГГ происходит резкое падение мощности реактора (из-за сгорания ГГ резко падает давление в АЗ, разогретый топливный раствор мгновенно вскипает – реактор переходит в подкритическое состояние); возвращение на прежнюю мощность происходит примерно через одну-две минуты [2]. Это приводит к периодическим провалам мощности. Перспективной альтернативой системе поджига является система каталитической

рекомбинации (СКР), основной идеей которой является утилизация ГГ с помощью его каталитической регенерации. Такая система позволит утилизировать образующийся ГГ в непрерывном режиме, без скачков давления и, в результате, без провалов мощности реактора. Образующаяся при этом вода непрерывно возвращается в топливный раствор, в результате чего его параметры (объем, концентрация) в процессе работы на мощности не изменяются.

Макет СКР состоит из имитатора корпуса реактора, каталитического блока, двух конденсаторов (холодильников), воздушного компрессора, регуляторов расхода газов (РРГ-12), измерителя расхода газов с ручным клапаном, датчиками водорода, температуры и давления, устройствами отбора проб газовой среды, а также автоматизированной системы регистрации данных и управления. Схематическое изображение полномасштабного макета СКР приведено на рис. 1 [3].

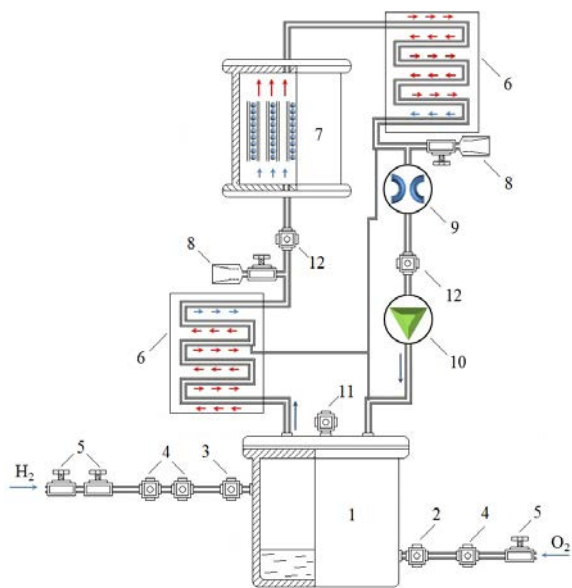


Рис. 1. Схематическое изображение полномасштабного макета СКР: 1 – металлический контейнер (имитатор корпуса АЗ) с имитатором топливного раствора; 2 – регулятор расхода кислорода; 3 – регулятор расхода водорода; 4 – аварийный электромагнитный клапан; 5 – аварийный вентильный клапан; 6 – конденсатор паров (холодильник); 7 – каталитический блок; 8 – шлиф для отбора проб газовой среды; 9 – расходомер; 10 – воздушный компрессор; 11 – датчик давления; 12 – датчик водорода

## Описание измерительной системы макета СКР

Измерительная система состоит из кейта (персонального компьютера с измерительной платой), набора измерительных приборов и управляющих элементов и обеспечивает измерение параметров макета, управление элементами макета, запись измеренных данных. Также измерительная система улучшает безопасность проводимых работ, отправляет управляющие сигналы на оборудование и оповещает оператора макета.

Измерительную систему составляют:

- два датчика давления типа МС-3000 (ДД1, ДД2);
- пять термопар типа КТХА (Т1, Т2, Т3, Т4, Т5);
- ротаметр типа MassView MV-306 (РО);
- два регулятора расхода газа типа РРГ-12 (РР1, РР2);
- регулятор мощности типа Maxwell MS-1VR3840 (РМ);
- два датчика концентрации водорода типа СЕНСОН-СВ-5023-СМ-Н2-2ЭХ (ДК1, ДК2);
- трубчатый электронагреватель;
- два нормально закрытых вентиля (НЗ1, НЗ2);
- измерительная плата типа NI PCI-6052E;
- блок разъемов типа SCB-68;
- персональный компьютер;
- электрическая коммутационная схема.

Принципиальная схема измерительной системы представлена на рис. 2.

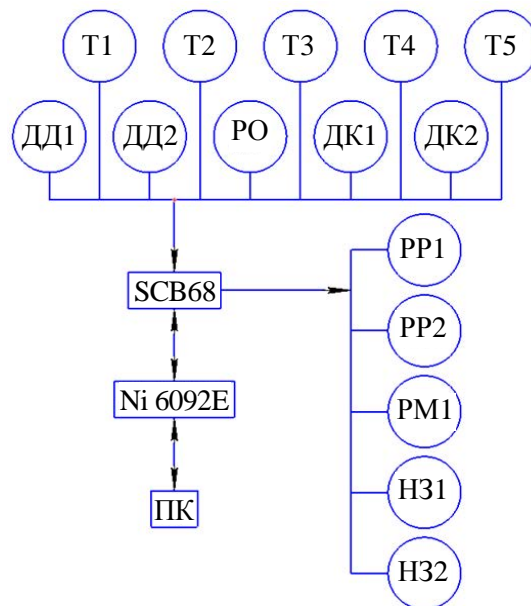


Рис. 2. Принципиальная схема измерительной системы макета. Измерительное оборудование: Т1–Т5 – термопары; ДД1, ДД2 – датчики давления; РО – ротаметр; ДК1, ДК2 – датчики концентрации водорода. Управляющее оборудование: РР1, РР2 – регуляторы расхода газа; РМ1 – регулятор мощности ТЭНа; НЗ1, НЗ2 – нормально закрытые клапаны. Блок контроля: SCB68 – блок разъемов; NI6092E – измерительная плата; ПК – персональный компьютер

Макет СКР моделирует работу СКР ИЯР ВИР-3 при работе ИЯР в статическом режиме на мощности до 30 кВт.

Основные параметры макета СКР:

- производительность макета СКР по водороду – до 0,22 м<sup>3</sup>/ч;
- принудительный расход парогазовой смеси в макете СКР – до 20 м<sup>3</sup>/ч;
- объемная концентрация водорода в макете СКР – не более 2,6%.

Требования к производительности СКР вытекают из следующих параметров перспективного растворного реактора:

- максимальная мощность реактора ВИР-3 при работе в статическом режиме (неограниченное время) – 30 кВт;
- топливо реактора ВИР-3 – водный раствор уранилсульфата (уран 90% обогащения по изотопу уран-235) с концентрацией ~60 г/л.

## Условия работоспособности макета СКР

Для отработки технических решений на этапе эскизного и технического проектирования будут проведены работы по испытанию полномасштабного макета СКР ИЯР ВИР-3.

Для топливного раствора, который будет использоваться в реакторе ВИР-3, выход радиолитического газа составляет 4,47 нл/МДж (где нл – «нормальный литр» – объем газа, приведенный к нормальным условиям).

Максимальная скорость наработки водорода в реакторе ВИР-3 составляет 0,483 нм<sup>3</sup>/ч (для максимальной статической мощности реактора – 20 кВт; коэффициента запаса – 1,5). Проектная производительность СКР по водороду – не менее 0,5 нм<sup>3</sup>/ч. Таким образом, макет СКР максимально приближенно моделирует работу растворного реактора и системы каталитической рекомбинации.

Для СКР были сформированы требования к нормальным условиям работы:

- давление рабочее – 95–110 кПа;
- прокачиваемая среда – смесь водяного пара, воздуха, водорода, кислорода;
- влажность – 100%;
- агрессивная среда (возможны пары серной кислоты, йод и ионизирующее излучение);
- максимальная рабочая температура катализатора в каталитическом блоке – до 350 °С;
- рабочая температура парогазовой смеси после холодильника – не более 35 °С;
- рабочая температура парогазовой смеси в газовом контуре после каталитического блока – не более 100 °С;
- расход парогазовой смеси – от 0 до 20 нм<sup>3</sup>/ч;
- максимальный перепад давления в контуре СКР – не более 5 кПа.

Условия работы СКР уточняются на этапе эскизного и технического проектирования [3]. Для контроля параметров процессов, управления и обеспечения безопасности полномасштабного макета СКР, предусмотрена система управления (СУ). Она производит обработку информации, поступающей от регуляторов расхода газов РРГ-112, расходомера MASS-VIEW MV-306, датчиков давления, термопар (температура газовой среды, каталитиче-

ских элементов, нагревательного элемента, холодильника и т. д.) и газоанализаторов водорода. По результатам обработки СУ выдает управляющие сигналы на регуляторы расхода водорода/кислорода и, в случае превышения аварийных уставок, сигнал на закрытие аварийных электромагнитных клапанов (с выдачей предупредительного/аварийного сигнала на экран оператора).

### Программное обеспечение макета СКР

Программное обеспечение (ПО) позволяет в режиме реального времени:

- регулировать скорости поступления водорода и кислорода в имитатор корпуса АЗ, а также скорости циркуляции парогазовой смеси в газовом контуре полномасштабного макета СКР (осуществлять управление газодинамическими характеристиками макета СКР);
- регистрировать изменение давления и температуры парогазовой смеси, концентрации водорода в газовом контуре, а также температуры катализатора и модельного топливного раствора (осуществлять контроль газодинамических характеристик макета СКР);
- формировать аварийные и предупредительные сигналы (с выдачей соответствующих сигналов на экран оператора) при превышении аварийных и предупредительных уставок

На рис. 3, 4 представлен пользовательский интерфейс системы управления макетом СКР.

Программное обеспечение может выдавать сигналы для аварийного останова макета, который предусматривает следующие автоматические действия СУ и действия оператора СУ. Действия СУ:

- перекрытие регуляторов расхода водорода и кислорода;
- перекрытие аварийных электромагнитных клапанов линий подачи водорода и кислорода;
- отключение электронагревателя из состава имитатора корпуса АЗ;

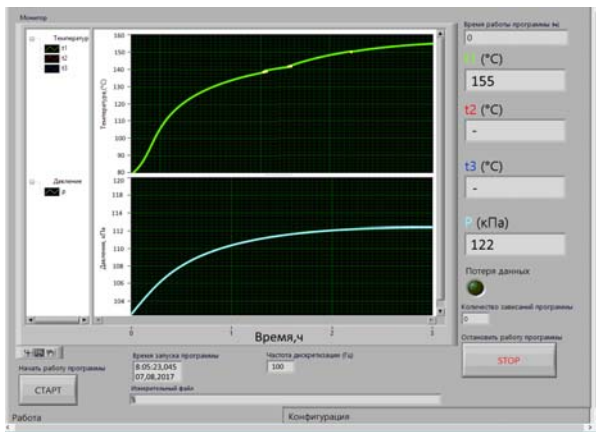


Рис. 3. Окно контроля основных показаний

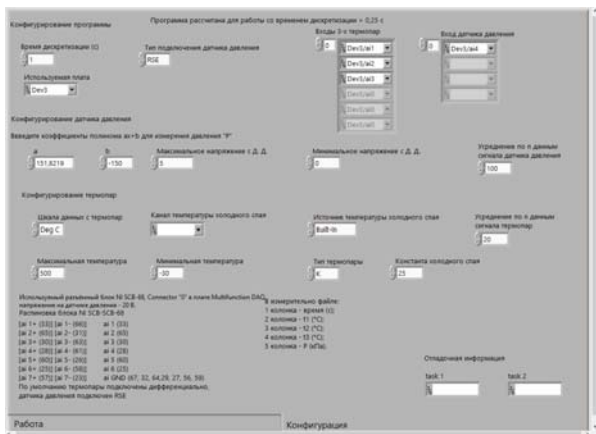


Рис. 4. Окно конфигурации ПО

– вывод на экран оператора сообщения «ПЕРЕКРЫТЬ КЛАПАНЫ ПОДАЧИ ВОДОРОДА И КИСЛОРОДА!»

Действия оператора СУ:

– перекрытие клапанов подачи водорода (в первую очередь) и кислорода (во вторую очередь);

– отключение воздушного компрессора (в случае его неисправности или нарушениях в работе);

– проверка состояния макета по показаниям СУ;

– выключение макета согласно Регламенту обеспечения безопасности работ на макете СКР;

– установление и устранение причины отказа.

Указания для оператора СУ:

– целевое значение расхода паровоздушной смеси в макете СКР  $Q_{\text{ном}}$  устанавливается

перед началом проведения работ на макете, исходя из значения расхода водорода  $Q_{\text{н}}$  по калибровочной зависимости  $Q_{\text{ном}}(Q_{\text{н}})$ , построенной при пусконаладке макета (значение  $Q_{\text{ном}}$  определяется как минимальное значение расхода, обеспечивающее для данного расхода водорода  $Q_{\text{н}}$  объемную концентрацию водорода на входе в каталитический блок не более 1,2%);

– начальное давление в макете  $P_0$  соответствует значению атмосферного давления в помещении размещения макета (достигается выравниванием окружающего давления и давления в макете после включения воздушного компрессора и нагревателя и достижения стационарного состояния);

– целевое значение температуры имитатора топливного раствора задается перед проведением работ и поддерживается с помощью нагревателя [4, 5].

## Результаты работы

Измерительно управляющий узел макета СКР необходим для отработки на макете системы каталитической рекомбинации реактора ВИР-2М, которая позволит расширить облучательные параметры реактора. Основные возможности измерительно управляющего узла:

1) регулировать скорости поступления водорода и кислорода в имитатор корпуса АЗ, а также скорости циркуляции парогазовой смеси в газовом контуре полномасштабного макета СКР (осуществлять управление газодинамическими характеристиками макета СКР);

2) регистрировать изменение давления и температуры парогазовой смеси, концентрации водорода в газовом контуре, а также температуры катализатора и модельного топливного раствора (осуществлять контроль газодинамических характеристик макета СКР);

3) формировать аварийные и предупредительные сигналы (с выдачей соответствующих сигналов на экран оператора)

при превышении аварийных и предупредительных уставок.

В дальнейшем, для улучшения облучательных возможностей реактора, в статическом режиме работы планируется использовать систему каталитической рекомбинации в качестве дополнения к существующей системе поджига гремучего газа.

### Список литературы

1. Колесов В. Ф. Аперiodические импульсные реакторы: Монография в 2 т. – Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2007. Т. 1. С. 144–156.

2. Аллен А. О. Радиационная химия воды и водных растворов. – М.: ГосАтом Издат, 1963. 197 с.

3. Авдеев А. Д., Богомоллова Л. С., Волгутов В. Ю., Глухов Л. Ю., Гречушкин В. Б., Девяткин А. А., Дягель А. Р., Жогова К. Б., Кубасов А. А., Москвин Н. И., Пикулев А. А., Плужан К. Г., Сизов А. Н., Табаков С. О., Турутин С. Л., Хоружий В. Х., Шлячков Н. А., Шуркаев А. В., Юнин Д. А. Перспективный растворный импульсный реактор: нейтронно-физические характеристики и облучательные параметры // ВАНТ. Сер. Физика ядерных реакторов. 2021. Вып. 4. С. 54–64.

4. Пикулев А. А., Волгутов В. Ю., Шлячков Н. А., Юнин Д. А., Дягель А. Р. Разработка и испытания макета системы каталитической рекомбинации радиолитического газа, образующегося в топливном растворе исследовательских реакторов // ВАНТ. Сер. Физика ядерных реакторов. 2020. Вып. 4. С. 4–16.

5. Пат. RU2 748214 С1 МПК G-21С 1/24 (2006.01). Способ преобразования водородосодержащей среды и устройство реализации способа / А. Пикулев, В. Волгутов, Н. Шлячков, Л. Глухов, В. Голубева, А. Кубасов, Д. Юнин, А. Дягель (Россия) // Изобретения. Полезные модели. 2021. № 15.

Контактная информация –  
Дягель Антон Русланович,  
инженер по испытаниям 2 категории,  
РФЯЦ-ВНИИЭФ,  
e-mail: otd4@expd.vniief.ru

Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика ядерных реакторов, 2022, вып. 4, с. 72–77.