

АВТОМАТИЗАЦИЯ ИЗМЕРЕНИЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ ИЗОТОПОВ ВОДОРОДА ЧЕРЕЗ КОНСТРУКЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Н. Е. Гурин, О. П. Вихлянцева, А. В. Курякин, А. В. Вертей

РФЯЦ-ВНИИЭФ, Саров, Нижегородская обл.

e-mail: otd4@expd.vniief.ru

Введение

В РФЯЦ-ВНИИЭФ интенсивно развивается тематика, связанная с изучением взаимодействия изотопов водорода с конструкционными материалами (КМ). Это обусловлено, в частности, потребностями развития современных направлений в энергетике – созданием ядерных реакторов нового поколения, созданием материалов и топливного цикла термоядерных реакторов, а также созданием материалов и инфраструктуры водородной энергетики.

В конструкционных материалах, работающих в среде изотопов водорода при высоких давлениях (до нескольких тысяч атмосфер) и температурах (сотни градусов) происходят изменения прочностных характеристик, в основном, вследствие диффузии и накопления изотопов водорода в структуре КМ [1]. При длительном пребывании образцов в среде изотопов водорода при высоких давлениях и температурах диффузионные потоки через образец могут быть достаточно велики, что в свою очередь приведет к образованию взрывоопасных смесей водорода с кислородом воздуха и к ухудшению радиационной обстановки в случае работы с тритием.

Актуальной задачей является получение экспериментальных данных по проницаемости изотопов водорода через КМ в зависимости от давления и температуры. Частью таких исследований является получение экспериментальных данных о коэффициентах диффузии, водородопроницаемости и растворимости изотопов водорода при высоких давлениях и температурах, а также получение зависимостей этих параметров от давления и температуры в области больших внутренних напряжений (влияние напряженно-деформированного состояния).

Для проведения экспериментов в этой области, используется разработанная в РФЯЦ ВНИИЭФ исследовательская установка «ПЕГАС» [2]. Работы, проводимые на установке, относятся к категории особо опасных, поэтому для контроля параметров и управления узлами установки была разработана автоматизированная система контроля и управления.

Исследовательская установка «ПЕГАС»

Исследовательская установка «ПЕГАС» позволяет проводить измерения проницаемости изотопов водорода через КМ в широком диапазоне температур (20–1000 °С) и давлений (1–3000 кгс/см²).

Установка включает в себя следующие составные части (рис. 1):

1. Блок откачки и напуска газа.
2. Блок диффузионных ячеек (ДЯ).
3. Аналитическая часть.
4. АСКУ.

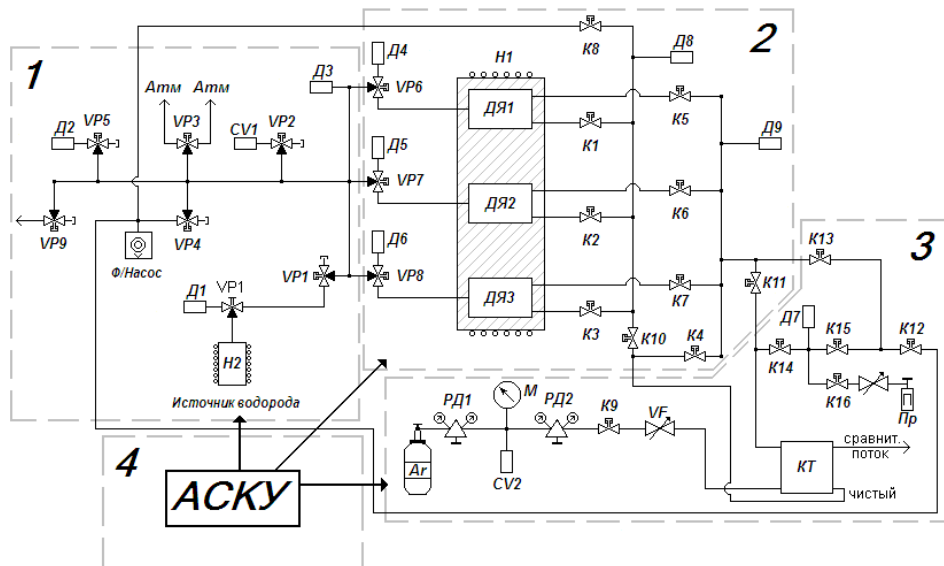


Рис. 1. Блок-схема установки «ПЕГАС». ДЯ1-ДЯ3 – диффузионные ячейки; К1-16 – клапаны электромагнитные; VF – регулятор расхода газа Cole Parmer; КТ – катарометр; VP1-9 – вентили пневматические; РД1, РД2 – редуктора; CV1, CV2 – буферные емкости; Д1, Д3-6 – датчики давления типа AP-17; Д2, Д7-9 – датчики измерения вакуума (Balzers); Пр – пробоотборник; Ф/Насос – насос форвакуумный; Н1 – нагревательный элемент с медным теплообменником; Н2 – нагревательный элемент, Ar – баллон с аргоном

Блок откачки и напуска газа (см. блок 1 на рис. 1) включает в себя вентили высокого давления с пневматическим приводом, датчики измерения высокого давления, датчики измерения низкого давления (вакуума), форвакуумный насос, буферную емкость (CV1), источник водорода и нагревательный элемент Н2. Откачные системы обеспечивают возможность откачки обеих сторон образца до вакуума не хуже $1,3 \times 10^{-2}$ Па.

Блок ДЯ (см. блок 2 на рис. 1) включает в себя диффузионные ячейки, нагревательный элемент Н1, предназначенный для выравнивания температурного поля по объему образца, электромагнитные клапаны, пневматические вентили, датчики высокого и низкого давления.

Аналитическая часть (см. блок 3 на рис. 1) содержит баллон с аргоном, газовые редукторы, манометр, буферную емкость, емкость с эталонным газом (пробоотборник), регулятор расхода газа (VF), электромагнитные клапаны, датчик давления. Для измерения концентрации примесей в газе-носителе, используется детектор теплопроводности (катарометр). Детектор теплопроводности является универсальным детектором, он реагирует на все вещества (ор-

ганические и неорганические), теплопроводность которых отличается от теплопроводности газа-носителя. В его основе лежит принцип изменения сопротивления материалов от температуры. Сигнал с детектора регистрируется модулем аналогового ввода I-7011 и представляет собой хроматографический пик. Площадь пика пропорциональна сигналу детектора и количеству вещества в пробе, на чем и основано количественное определение. Детектор реагирует на все компоненты, за исключением газа-носителя.

Дистанционное управление и контроль рабочих параметров установки «ПЕГАС», а также регистрация измеряемых параметров, обеспечивается автоматизированной системой установки.

Автоматизированная система контроля и управления

При работе на установке, нужно измерять и стабилизировать температуру нагревателей, отключать их при превышении заданных температур и давлений. Контролировать эти процессы, а также поддерживать заданные давления и температуры, отображать в графическом и цифровом виде измеряемые параметры, вести протокол эксперимента, собирать и обрабатывать данные, получаемые в ходе опыта, позволяет автоматизированная система установки «ПЕГАС».

АСКУ представляет собой распределенную сеть, состоящую из управляющего компьютера, находящегося на удаленном расстоянии (в другом помещении) от установки, набора модулей аналогового и дискретного ввода/вывода серии I-7000, а также устройств измерения температур и давлений. Модули аналогового ввода/вывода обеспечивают высокую точность и помехоустойчивость при измерениях электрических сигналов температурных и тензометрических датчиков. Модули объединяются в локальную сеть по двухпроводной линии связи в стандарте RS-485 на скорости 115200 бод и питаются от блока питания с напряжением +24В. Между компьютером и модулями I-7000 имеется гальваническая развязка 3000 Вольт постоянного тока. Кроме того, все модули управления серии I-7000 имеют сторожевой таймер (WatchDog), который при возникновении неисправности переводит модуль в безопасный режим. Блок-схема системы АСКУ представлена на рис. 2.

АСКУ установки обеспечивает:

- измерение температур термopарами типа К (хромель-алюмель);
- измерение давлений тензометрическими датчиками и датчиками фирмы Balzers;
- регулирование и стабилизацию температуры термостата детектора теплопроводности, с использованием для обратной связи платиновых датчиков типа Pt100;
- управление электронагревателями и стабилизацию температуры нагрева;
- управление форвакуумным насосом;
- контроль наличия подаваемого напряжения на электронагреватели и насос;
- управление пневматическими вентилями;

- управление электромагнитными клапанами;
- динамическое отображение всех измеряемых параметров в виде графиков и таблиц;

- отображение состояния клапанов на экране управляющего компьютера;
- сохранение результатов измерений аналоговых параметров;
- обработку экспериментальных данных.

Характеристики АСКУ:

- количество измеряемых аналоговых сигналов – 22
- количество дискретных сигналов контроля – 50
- количество дискретных сигналов управления – 25
- частота опроса каналов – до 10 Гц
- отображение информации – в реальном времени
- время непрерывной работы – не ограничено

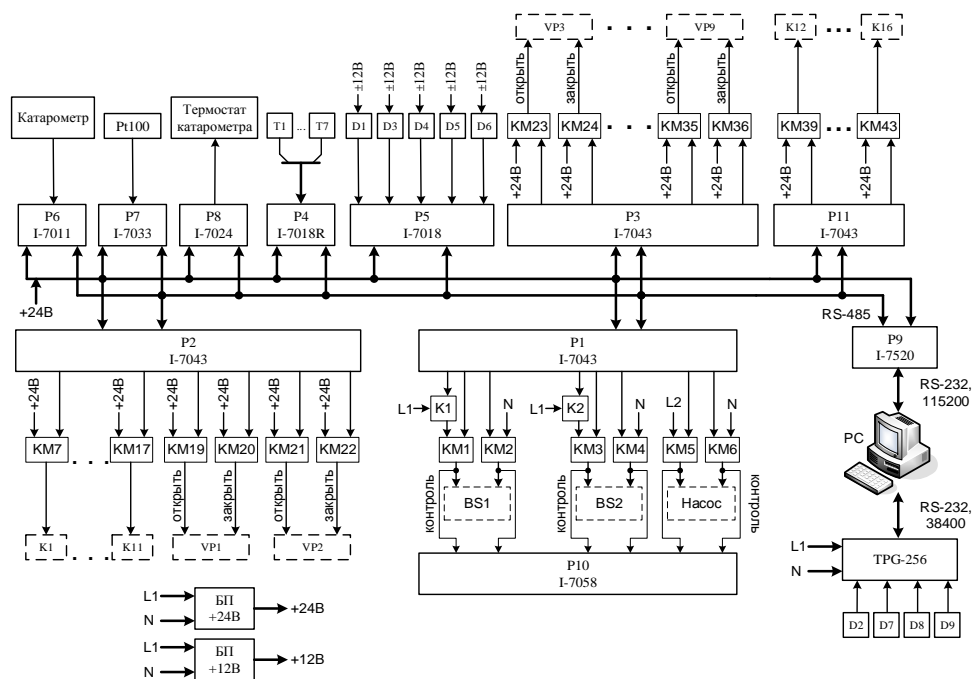


Рис. 2. Блок-схема АСУ установки «ПЕГАС». PC – управляющий компьютер системы; I-7520 – преобразователь интерфейса RS-232 в RS-485; VP1-VP9, K1-K16 – контролируемые вентили и электромагнитные клапаны; TPG-256 – 6-канальный контроллер для вакуумных датчиков фирмы Balzers; D2, D7-D9 – датчики вакуума фирмы Balzers; D1, D3-D6 – датчики давления тензометрические; KМ1-KМ43 – реле электромагнитные; K1, K2 – реле твердотельные; Pt100 – резистивный платиновый термо-датчик; T1-T7 – термпары типа хромель-алюмель; I-7018 – 8-канальный модуль аналогового ввода; I-7043 – 16-канальный модуль дискретного вывода; I-7053 – 16-канальный модуль дискретного ввода; I-7011 – модуль аналогового ввода; I-7024 – 4-канальный 14-разрядный модуль аналогового вывода

АСКУ обеспечивает управление режимом нагрева двух объектов. Каждый канал управления включает термопару для измерения температуры объекта, твердотельное реле для управления процессом нагрева, электромагнитное реле для блокировки и нагревательный элемент.

В качестве метода для регулирования мощности нагревателей выбран метод широтно-импульсной модуляции. Данный метод позволяет стабилизировать температуру нагреваемого объекта с точностью 1–2 °С. На выходе управляющих цепей идет контроль наличия напряжения с помощью модуля I-7058. Допустимость такого метода регулирования обоснована тем, что нагреваемые объекты достаточно массивны и колебания, связанные с меандром, эффективно интегрируются и на температуре объекта не проявляются.

Схемы релейных блокировок позволяют исключить выход температур и давлений за предельно допустимые значения. Реле управляются программно через многоканальный модуль цифрового вывода (I-7043). Для каждого канала управления предусмотрена возможность программной установки блокировок по температуре, давлению и таймеру.

Метод измерения давлений мостовыми тензометрическими датчиками организован посредством моста Уитстона. Питание датчиков обеспечивается высокостабильным блоком питания с выходным напряжением +12В.

Термо-ЭДС термопар, а также напряжения разбаланса тензометрических мостов измеряются многоканальным модулем аналогового ввода (тип – I-7018) с погрешностью 0,05 %. Преобразование измеренных значений напряжения в температуру или давление выполняется программным образом. Для преобразования зарегистрированных напряжений, используются полиномиальные калибровки. Экспериментальная калибровочная зависимость задается массивом точек кривой и аппроксимируется полиномом по методу наименьших квадратов. Значения давлений и температур вычисляются по измеренному напряжению с использованием полученной полиномиальной калибровочной зависимости.

Программное обеспечение для автоматизации экспериментов на установке «ПЕГАС»

В качестве основного программного средства для создания АСКУ исследовательской установкой «ПЕГАС», используется официально зарегистрированный пакет CRW-DAQ [3], разработанный и применяемый в РФЯЦ-ВНИИЭФ. Пакет CRW-DAQ является программной средой для решения задач экспериментальной физики: сбора данных, управления и автоматизации физических установок, хранения, анализа и первичной обработки экспериментальных данных [4, 5].

Открытая программная среда CRW-DAQ облегчает разработку драйверов и интеграцию разнообразных измерительных устройств в одну систему. Открытый исходный код дает полную информацию о деталях работы системы управления, позволяя сделать ее поведение более предсказуемым и надежным. Характерной особенностью исследовательских установок является их частая модернизация и открытая программная среда позволяет быстро адаптировать программное обеспечение к новым условиям.

В системе CRW-DAQ программы разрабатываются на встроенном в пакет языке DAQ-Pascal. Каждая программа АСКУ работает в отдельном потоке, в изолированном друг от друга адресном пространстве и решает определенную задачу. Потоки взаимодействуют между собой через базу данных реального времени (кривые и теги) и сообщения. Структура автоматизированной системы позволяет оперативно адаптировать ее к внешним изменениям, таким как обновление или ввод новой аппаратуры, датчиков и каналов управления. Параллелизм, изоляция ресурсов, а также иерархическая распределенная структура управления обеспечивают надежность и отказоустойчивость работы установки.

Для высокоточного поддержания температуры катарометра используется программный ПИД-регулятор. ПИД-регулятор вырабатывает выходной сигнал, который является суммой трех составляющих: пропорционального регулирования, регулирования по интегралу и регулирования по производной [6]. Первая часть пропорциональна ошибке выходной величины – разнице между реальным и целевым значением температуры. Вторая часть пропорциональна интегралу по времени ошибки выходной величины, а третья часть пропорциональна производной ошибки.

Основная мнемосхема, изображенная на рис. 3, полностью соответствует принципиальной схеме газового контура установки «ПЕГАС».

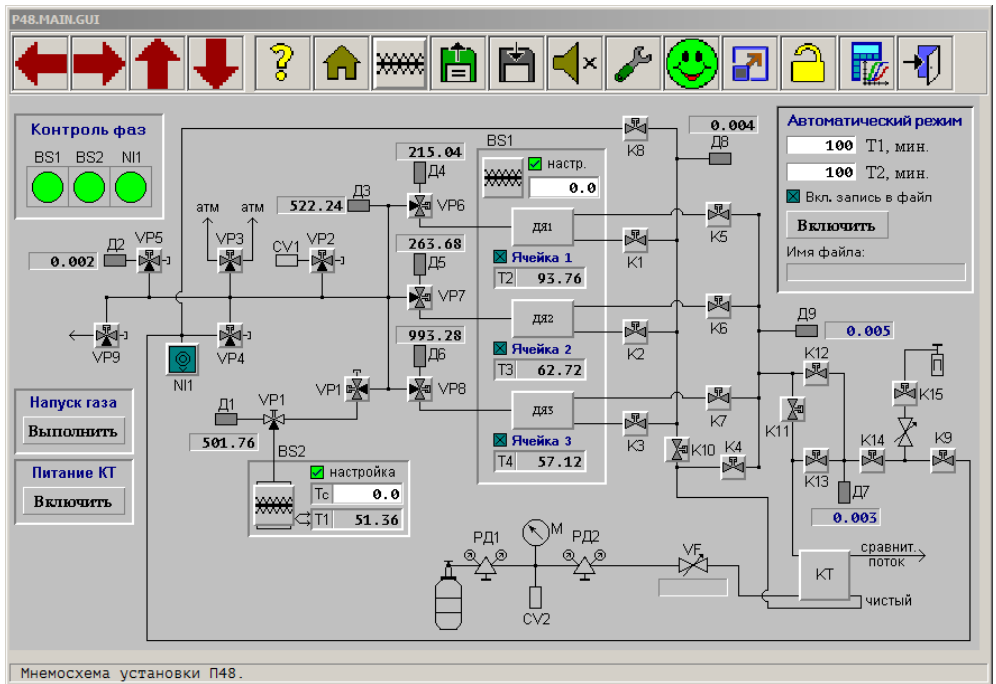


Рис. 3. Мнемосхема управляющей программы

Автоматизированная система позволяет проводить эксперименты длительное время без участия обслуживающего персонала. Для работы системы в автоматическом режиме, необходимо установить требуемое время открытия, в

течение которого газ-носитель продувается через диффузионную ячейку, омывая выходную поверхность исследуемого образца, и смешивается с диффундирующим через образец водородом, и время закрытия, необходимое для продувки катарометра чистым газом. В автоматическом режиме происходит последовательное открытие и закрытие диффузионных ячеек, а также запись полученных в ходе эксперимента данных в текстовый файл.

Во время автоматической работы системы, регистрация продиффундировавшего водорода происходит в интегральном, либо дифференциальном режиме. В интегральном режиме идет накопление данных катарометра и автоматический расчет площадей пиков сигнала катарометра с нескольких диффузионных ячеек, переключаемых в циклическом режиме. В дифференциальном режиме происходит непрерывная регистрация потока только одной ячейки. Режим работы выбирается автоматически, в зависимости от количества используемых ячеек.

Интегральный режим позволяет проводить исследование нескольких образцов одновременно. Автоматический расчет площадей пиков значительно облегчает последующую обработку данных. Данные, полученные в ходе эксперимента с каждой ячейки, записываются в текстовый файл в структурированном виде. Структура файла имеет табличный вид, каждая строка в нем идентифицирована номером ячейки и содержит данные, относящиеся к этой ячейке, такие как, время открытия ячейки, время закрытия и площадь пика, зарегистрированного катарометром.

Для первичной обработки экспериментальных данных, в АСКУ реализована программа, которая позволяет рассчитать количество продиффундировавшего водорода, поток водорода, построить график зависимости потока от времени и рассчитать подинтегральную площадь $S1$ и площадь дополнительной к прямоугольнику области $S2$ (рис. 4).

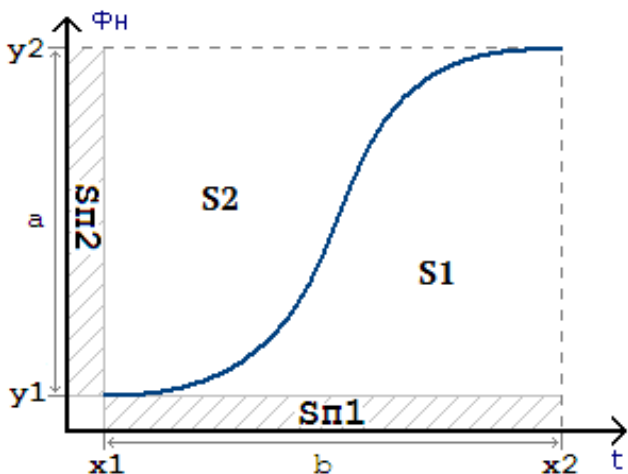


Рис. 4. График S-образной кривой

Поток водорода Φ_n – это количество газа, проходящего в единицу времени через исследуемый образец. Значение потока определяется по формуле:

$$\Phi_H = \frac{Q_H}{dt} \quad (1)$$

где Q_H – количество водорода, dt – время накопления водорода на выходной стороне ячейки.

Количество водорода определяют по формуле:

$$Q_H = ax + b \quad (2)$$

где a и b – калибровочные коэффициенты, x – площадь пика, зарегистрированного катарометром.

Время накопления водорода на выходной стороне ячейки – это время, которое ячейка находится в закрытом состоянии и накапливает диффундирующий сквозь образец водород и определяется по формуле:

$$dt = t_{o2} - t_{c1} \quad (3)$$

где t_{o2} – время открытия следующей ячейки, t_{c1} – время закрытия предыдущей ячейки.

Для построения S -образной кривой вычисляется среднее значение времени, в течение которого исследуемый образец омывается газом-носителем.

$$t = \frac{(t_2 - t_1)}{2} + t_1. \quad (4)$$

Площадь S_1 (площадь под кривой) вычисляется интегрированием этой кривой, причем после применения функции интегрирования, вычитается площадь подложки $S_{п1}$:

$$S_1 = \int_{x_1}^{x_2} f(x) - (x_2 - x_1)y_1. \quad (5)$$

Для расчета площади S_2 , нужно вычислить площадь S прямоугольника, учитывая при этом площади подложек $S_{п1}$ и $S_{п2}$:

$$S = a \cdot b$$

где $a = y_2 - y_1$, $b = x_2 - x_1$, а затем вычесть из площади прямоугольника площадь под кривой:

$$S_2 = S - S_1.$$

На рис. 5 изображена S -образная кривая, построенная после выполнения расчетов. Площади S_1 и S_2 равны соответственно 0,0142 и 0,0056.

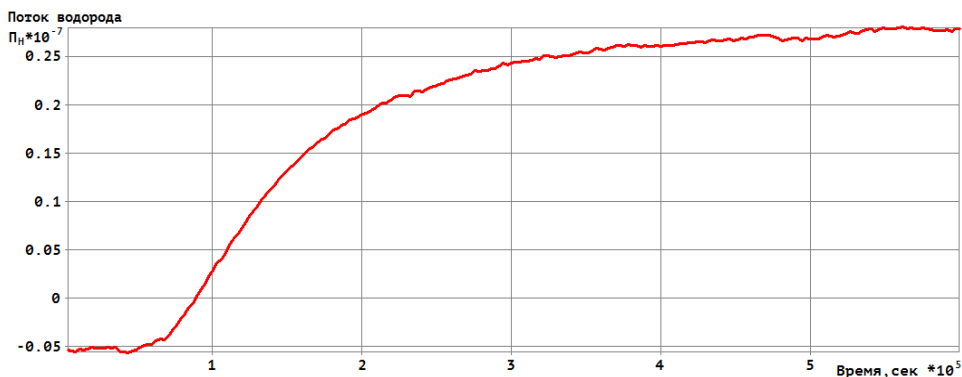


Рис. 5. График построенной S -образной кривой

После выполнения расчетов, полученные значения используются для определения следующих параметров водородопроницаемости:

- Коэффициент диффузии $D_H = \frac{r_1^2 - r_2^2 + (r_1^2 + r_2^2) \ln \frac{r_1}{r_2}}{4t_k \ln \frac{r_1}{r_2}} \frac{S_1 + S_2}{S_1}$ – вели-

чина, характеризующая количество водорода, диффундирующего через единицу площади за одну секунду при градиенте концентрации водорода, равном единице.

- Коэффициент водородопроницаемости: $P_H = \frac{\Phi_H (r_1 - r_2)}{\pi (r_1 + r_2) L_3 (\sqrt{p_1} - \sqrt{p_2})}$ –

величина, численно равная плотности потока водорода через образец приведенной к единице толщины.

- Растворимость: $S_H = \frac{P_H}{D_H}$ – равновесное количество водорода, кото-

рое может быть растворено в металле при заданной температуре и давлении.

Выводы

Разработанная автоматизированная система и программное обеспечение для нее, позволили проводить исследования по проницаемости изотопов водорода через конструкционные материалы и получать экспериментальные данные о коэффициентах диффузии, водородопроницаемости и растворимости изотопов водорода при высоких давлениях и температурах.

Разработка и внедрение методов по автоматизированному расчету количества протиффундировавшего водорода через образцы, а также автоматизация проведения экспериментов по определению кинетических параметров водородопроницаемости позволили значительно повысить эффективность и безопасность оператора при работе на установке, снизить трудовые затраты при проведении экспериментов, а также снизить вероятность возникновения ошибок при обработке большого объема экспериментальных данных за счет автоматизации расчетов.

Список литературы

1. Агеев В. Н., Бекман И. Н., Бурмистрова О. П. Взаимодействие водорода с металлами / Под ред. А. П. Захарова. – М.: Наука, 1987.
2. Вертей А. В. Установка для изучения водородопроницаемости конструкционных материалов. Сборник докладов Четвертой международной Школы молодых ученых и специалистов «Взаимодействие изотопов водорода с конструкционными материалами. IHISM-08» Нижний-Новгород, 2008. С. 299.
3. Курякин А. В., Виноградов Ю. И. Программа для автоматизации физических измерений и экспериментальных установок (CRW-DAQ) // Свиде-

тельство РФ об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2006612848 от 10.08.2006 г., сайт www.crw-daq.ru.

4. Курякин А. В., Виноградов Ю. И. Программное обеспечение автоматизированных измерительных систем в области тритиевых технологий // ВАНТ. Сер.: Термоядерный синтез, 2008, вып. 2.

5. Vinogradov Yu. I., Kuryakin A. V., Yukhimchuk A. A. Measurement and control systems of tritium facilities for scientific research // Fusion Science and Technology, July/August 2005, Vol. 48, P. 696–699.

6. Олссон Г., Пиани Дж. Цифровые системы автоматизации и управления. Невский диалект, Санкт-Петербург, 2001.