

# СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ИНТЕГРАЛЬНОГО И ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО ВАРИАНТОВ МЕТОДА ПРОНИЦАЕМОСТИ. МАТЕМАТИЧЕСКИЙ АППАРАТ. ЭКСПЕРИМЕНТ

*В. Н. Лобко*

Владимирский государственный университет  
lobko\_vn@laser-2.vpti.vladimir.ru

*Дан сравнительный анализ интегрального и дифференциального вариантов метода проницаемости для определения параметров диффузии водорода в металлах. Рассмотрены математические основы методов. Проанализированы экспериментальные аспекты их реализации.*

*The comparative analysis of integral and differential versions of the method of permeability for determining the diffusion parameters of hydrogen in metals was done. The mathematical foundations of both methods were considered. The experimental aspects of their implementation were analysed.*

## Введение

В настоящее время существует большой набор экспериментальных методов определения коэффициента диффузии водорода в металлах при повышенных температурах. Пожалуй, самой значимой среди них является группа методов водородопроницаемости. К одному из первых методов – методу Дайнеса-Бэррера (временной задержки), – за последние десятилетия добавились методы установления стационарного потока, осцилляции давления, концентрационных импульсов. Разработаны математические модели и создан математический аппарат, позволяющий в одном эксперименте определять не только коэффициент диффузии и коэффициент растворимости, но и, с помощью специальных методов параметрической идентификации, – весь набор констант поверхностных процессов.

Тем не менее, точность измерения коэффициента диффузии оставляет желать лучшего, составляя часто 5–8 % в рамках одного исследования; расхождение результатов разных исследователей может достигать нескольких десятков % и даже 200–300 % (брались результаты работ по чистым и хорошо отожженным металлам) [1, 2]. Как известно, на водородопроницаемость оказывает существенное влияние чистота поверхности и объема металла и наличие несовершенств структуры, но, наряду с этим, источником ошибок могут

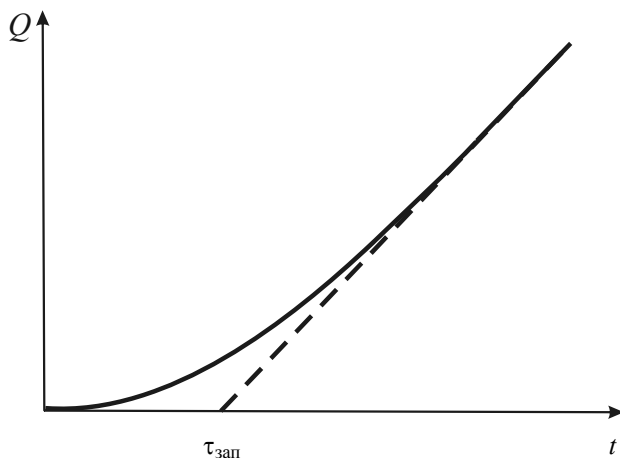
быть погрешности самих методов и некоторые экспериментальные факторы. Указанная проблема давно привлекала внимание исследователей, о чем свидетельствуют попытки регламентировать и стандартизировать диффузионные эксперименты по проницаемости [3–6]. При этом проводились эксперименты на одних и тех же и одинаково подготовленных образцах, но на разных экспериментальных установках. Успеха это не имело, и задача повышения точности определения параметров не решена и по сей день. Поэтому актуальным является поиск новых, альтернативных методов исследования и схем эксперимента на их основе.

В настоящей работе делается попытка проанализировать некоторые возможные источники столь высоких погрешностей для идеальных систем металл-водород (первая краевая задача, чистые металлы в отсутствие несовершенств структуры) и наметить пути их уменьшения.

### Краткий обзор методов проницаемости

По основной характеристике, используемой для расчета искомых параметров и прямо или косвенно определяемой в эксперименте, метод проницаемости можно подразделить на два варианта – интегральный и дифференциальный.

В большинстве экспериментов проникновение водорода осуществляется из резервуара через дисковый или цилиндрический образец, вакуумно уплотненный с торцов, в предварительно вакуумированный приемник при нулевом начальном условии. В интегральных методах (рис. 1) измеряется количество прошедшего газа (чаще всего – по росту давления в замкнутом измерительном объеме) в зависимости от времени, в дифференциальных методах измеряемым параметром является временная зависимость выходного потока (рис. 2, кривая 1).



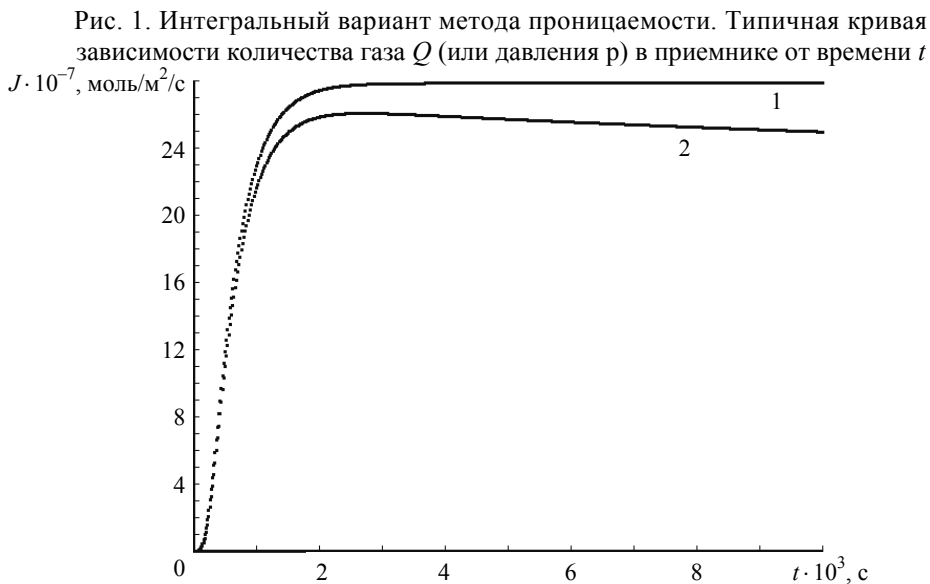


Рис. 2. Дифференциальный вариант метода проницаемости. Типичная кривая зависимости удельного потока в приемнике  $J$  от времени  $t$  (1). Кривая потока в приемнике ограниченной емкости в режиме нестационарной проницаемости (2)

Конкретным воплощением интегрального варианта является метод Дайнеса-Бэррера. К дифференциальному варианту можно отнести методы установления стационарного потока, осцилляции давления и концентрационных импульсов. Предложенный авторами метод [7] является интегральным.

Измеряемым параметром метода Дайнеса-Бэррера (временной задержки, time-lag) [8–12] является время запаздывания – пересечение с осью времени асимптоты к кривой выходного давления или количества (см. рис. 1); по нему определяется коэффициент диффузии:

$$D = l^2 / (6\tau_{\text{зап}}), \quad (1)$$

где  $l$  – толщина пластины.

В разных вариантах метода измерения проводят либо в замкнутом объеме приемника достаточно большой величины, чтобы выходная концентрация могла считаться нулевой по сравнению с входной (квазистационарная диффузия), либо – перекачивают прошедший газ из приемной камеры в измерительную. Так или иначе, интегральные методы характеризуются накоплением прошедшего газа. В первоначальном виде метода Дайнеса-Бэррера растворимость водорода не определяется. Вариант с перекачкой газа имеет существенный недостаток: потеря некоторого количества газа в насосе, которую трудно учесть.

Дифференциальный вариант, – метод установления стационарного потока (рис. 2, кривая 1), позволяет в одном эксперименте определять коэффициент диффузии  $D$  и коэффициент растворимости водорода в металле  $K$  (наиболее полно и последовательно метод изложен в [13]). Здесь на выходе осуществляется откачка через калиброванное отверстие с постоянной скоростью, чтобы добиться установления стационарного потока (горизонтальный участок

кривой 1 на рис. 2). Рабочие давления в приемнике не превышают  $\approx 10^{-5}$  Торр, что позволяет считать их нулевыми по сравнению с давлениями во входном резервуаре и делает возможным применение масс-спектрометров для измерений. Считается, что по толщине образца устанавливается линейный концентрационный профиль водорода (если  $D = \text{const}$ ). Масс-спектрометр может быть откалиброван или по парциальному давлению водорода или по потоку. Так или иначе, в методе определяется временная зависимость выходного потока, который выходит на стационар ( $J = \text{const}$ ); в случае измерения парциального давления, такую зависимость дифференцируют. Из кривой потока сначала вычисляется  $D$  по «особым точкам», одной из которых является время запаздывания (дифференциальная кривая вида рис. 2, кривая 1, и интегральная кривая вида рис. 1 «взаимобращаемы»). Затем, по величине удельного стационарно-го потока, определяется коэффициент растворимости (константа Сиверкса:

$$K = \frac{J_{\text{st}} l}{D(\sqrt{p_{\text{in}}} - \sqrt{p_{\text{out}}})}, \quad (2)$$

где  $J_{\text{st}}$  – стационарный поток,  $p_{\text{in}}$  и  $p_{\text{out}}$  – давление водорода в резервуаре и приемнике. (Можно заметить, что в методе Дайнеса-Бэррера также имеется возможность определения  $K$  после дифференцирования интегральной кривой). Отличительной особенностью этого (и других) дифференциального метода является постоянная откачка приемника с самого начала эксперимента ( $t = 0$ ). В этой связи можно заметить, что определяемая дифференциальная кривая (вида рис. 2, кривая 1) будет суммой выходного потока водорода и скорости истечения через капилляр. Последняя, в период выхода на стационар, будет меняться по соответствующему закону и исказит ход суммарной кривой потока. Это, в свою очередь, приведет к некоторому смещению «особых точек». То есть интегральная кривая, полученная из этой кривой потока, не будет вполне адекватна кривой метода Дайнеса-Бэррера вида рис. 1, а расчет  $D$  по «особым точкам» строго определен именно для последней.

Авторы [13] дополнили метод системой уравнений, учитывающих все основные фазовограничные процессы. Разработаны методы параметрической идентификации для определения всего набора констант водородопроницаемости [14].

В методе осцилляции давления [15, 16], после установления стационарного потока, на входной стороне пластины давление принудительно изменяется по гармоническому закону, при этом поток в приемнике бесконечной емкости также будет изменяться периодически (рис. 3) с меньшей амплитудой и запаздыванием по фазе  $\phi$ , значения которых будут зависеть от частоты  $\omega$ . От  $\phi$  зависит только коэффициент диффузии  $D$ , а амплитуда прошедшего сигнала  $A$  зависит от  $D$  и входной концентрации  $C_0$  (по ней определяется константа Сиверкса  $K$ ):

$$\text{tg } \phi = \frac{\text{tg}\left(l\sqrt{\omega/(2D)}\right) - \text{tgh}\left(l\sqrt{\omega/(2D)}\right)}{\text{tg}\left(l\sqrt{\omega/(2D)}\right) + \text{tgh}\left(l\sqrt{\omega/(2D)}\right)};$$

$$A = \frac{DC_0 S \sqrt{\omega/D}}{2 \left( \operatorname{sh} \left( l \sqrt{\omega/2D} \right) + \sin^2 \left( l \sqrt{\omega/2D} \right) \right)^{1/2}} \quad (3)$$

(основные расчетные формулы).

$J \cdot 10^{-7}$ , моль/м<sup>2</sup>/с

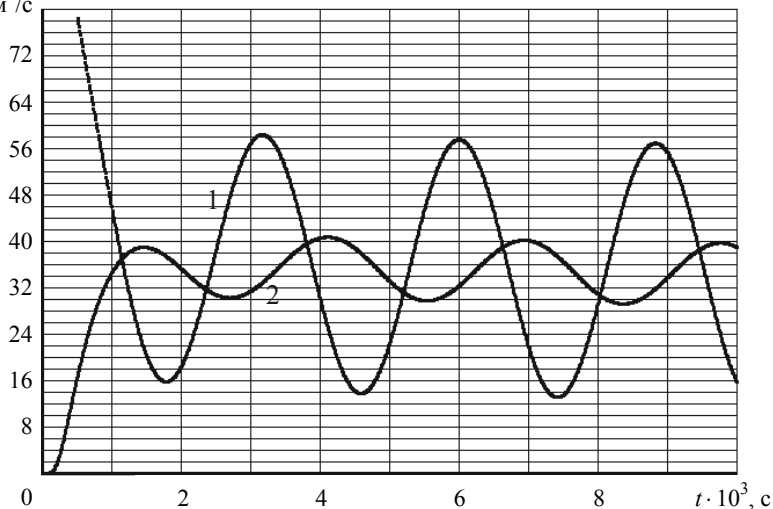
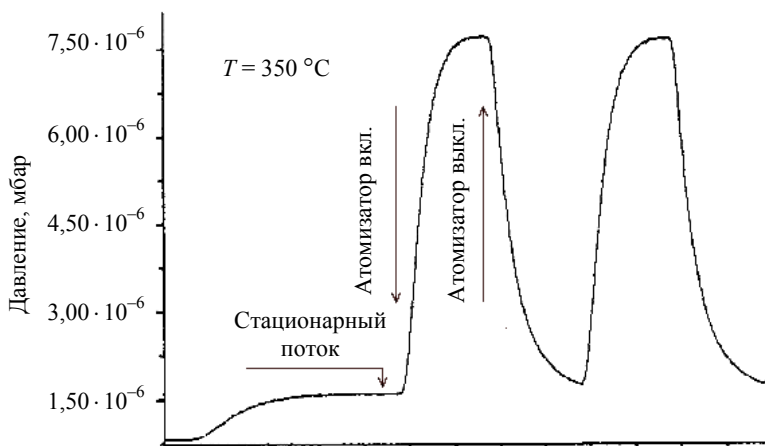


Рис. 3. Метод осцилляции давления. Зависимость входного (1) и выходного (2) потока от времени

Более прост в реализации метод концентрационных импульсов [17], который можно считать вариантом метода осцилляции давления. Здесь после установления стационарного потока во входной стороне пластины создаются прямоугольные импульсы концентрации скважности 2, что приводит к характерным «меандромам» изменения давления в приемнике (рис. 4). Метод также наиболее ценен при изучении фазовограничных реакций, и, кроме этого, – при изучении более сложных случаев объемной диффузии (захват в ловушки и т. д.).



148,0    148,5    149,0    149,5    150,0    150,5  
 Время, мик

Рис. 4. Изменение давления на выходе образца при реализации МКИ [16]

Часто методы осцилляции давления и концентрационных импульсов называют нестационарными, но это не совсем так. Правильнее их называть методами отклонения от стационарного потока.

Интегральный метод, предложенный авторами (7), позволяет рассчитать коэффициент диффузии  $D$ , если каким-то образом определены временные зависимости входной и выходной концентрации водорода в пластине и поток на ее входной или выходной стороне. В таком виде он может использоваться для схем экспериментов всех рассмотренных методов. Метод пока не учитывает влияние несовершенств объемной структуры металла, то есть, в общем случае, определяется эффективный  $D$ . Метод новый и пока имеет ограниченное применение, только в рамках первой краевой задачи, причем требуется сторонняя информация по коэффициенту растворимости  $K$  для расчета концентрации по давлению во входном и выходном объеме. Однако метод может и должен совершенствоваться.

Для идеальных систем металл-водород (чистые металлы без несовершенств структуры; первая краевая задача) методы концентрационных волн не дают выигрыша в точности [13]. Метод (7) – единственный из рассмотренных, который позволяет реализовать схему эксперимента с накоплением водорода в малом замкнутом приемном объеме (нестационарная диффузия,  $J \neq \text{const } \forall t$ ). Реализация этой схемы потенциально может дать выигрыш в точности определения  $D$  для идеальных систем в силу некоторых математических и экспериментальных особенностей. Анализ этих возможностей и посвящено дальнейшее рассмотрение.

### Математические аспекты водородопроницаемости

В практике изучения водородопроницаемости при малых концентрациях водорода сложилась ситуация, когда в подавляющем большинстве математических моделей (например, [13, 14, 17]) используется параболическое уравнение

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2}, \quad (4)$$

то есть уравнение диффузии, в котором априорно коэффициент диффузии считается постоянным. Особенностью систем металл-водород является отсутствие надежных методов измерения концентрации водорода по толщине образца,

что делает затруднительным прямое экспериментальное определение возможной  $D = f(c)$  и использование в моделях более общего уравнения диффузии:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( D(c) \frac{\partial c}{\partial x} \right). \quad (5)$$

Это квазилинейное параболическое уравнение; общее аналитическое решение для него неизвестно. Однако из теории неравновесной термодинамики следует, что  $D$  может зависеть от концентрации даже при малых концентрациях диффузанта [19]. Эта зависимость имеет термодинамическую основу и диктуется аналитическим видом функции химического потенциала от концентрации водорода в металлах. Она носит общий характер. В случае систем металл-водород включение в математические модели уравнения (5) возможно только на основе численных решений, но пока математика не дает готовых решений обратной задачи для рассматриваемого случая [20]. И если сказанное имеет под собой основания, это может служить одним из источников высоких погрешностей определения  $D$ . Метод (7) допускает модификацию в плане учета  $D = f(c)$ , для других методов это проблематично.

Нестационарный режим проницаемости можно получить, если сделать объем приемника малым, насколько это возможно, чтобы получить существенный рост выходного давления до величин, сравнимых с входным давлением. При этом на кривой выходного потока будет наблюдаться его снижение (рис. 2, кривая 2).

На кривых выходного потока дифференциального варианта метода проницаемости (рис. 2, кривая 1) существуют «особые точки»: а) время достижения половинного значения стационарного потока  $\tau_{1/2}$ ; б) время точки перегиба  $\tau_{\text{пер}}$ ; в) время запаздывания  $\tau_{\text{зап}}$ ; г) время достижения стационарного потока  $\tau_{\text{ст}}$ . В интегральном варианте имеют место те же «особые точки», только последняя заменяется на время достижения максимального значения потока  $\tau_{\text{max}}$ , если выходной поток проходит через максимум – рис. 2, кривая 2. По особым точкам можно рассчитать различными способами значение коэффициента диффузии  $D$ .

На кривой потока нестационарной проницаемости в малый приемный объем существует еще одна «особая точка» (рис. 5 и 6; для наглядности зависимость утрирована, реально ее получить затруднительно). Основные «особые точки», б) и г), могут быть довольно точно определены численным дифференцированием кривой рис. 5, т. е. – (рис. 6). Время точки перегиба (рис. 5) соответствует максимуму на кривой рис. 6, а время максимального потока (рис. 5) – пересечению с осью абсцисс (рис. 6). После прохождения максимума (выпуклость вверх) кривая замедляется и асимптотически приближается к оси абс-

цисс (выпуклость вниз). То есть существует еще одна точка перегиба, соответствующая минимуму на кривой рис. 6. Таким образом, этот метод объективно более информативен, чем метод установления стационарного потока, так как имеет на одну «особую точку» больше. Разумеется, это всего лишь потенциальная возможность, которая здесь просто отмечается.

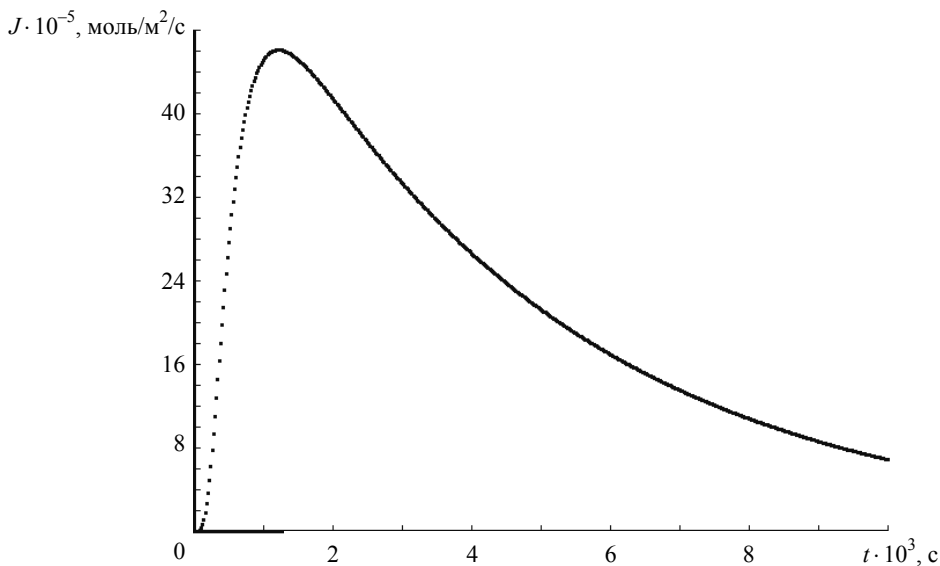


Рис. 5. Выходной поток  $J$  в зависимости от времени  $t$ ; проницаемость тонкой пластины при малом объеме приемника

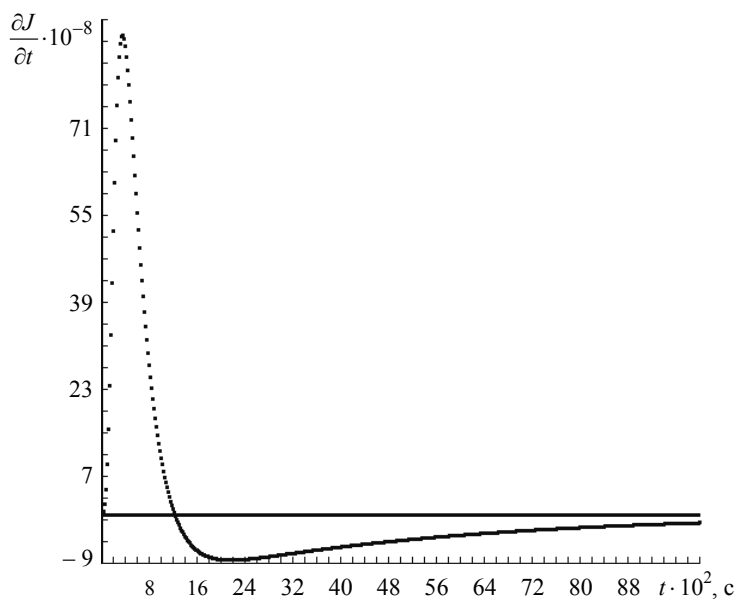


Рис. 6. Первая производная выходного потока  $J$  (рис. 5) по времени  $t$



Физический смысл точки максимума (рис. 6) проиллюстрирован на рис. 7. Он отражает характер заполнения водородом матрицы металла. До точки максимума наибольший рост концентрации имеет место в середине пластины, меньший – на выходной стороне. После этой точки наибольший рост концентрации наблюдается на выходной стороне.

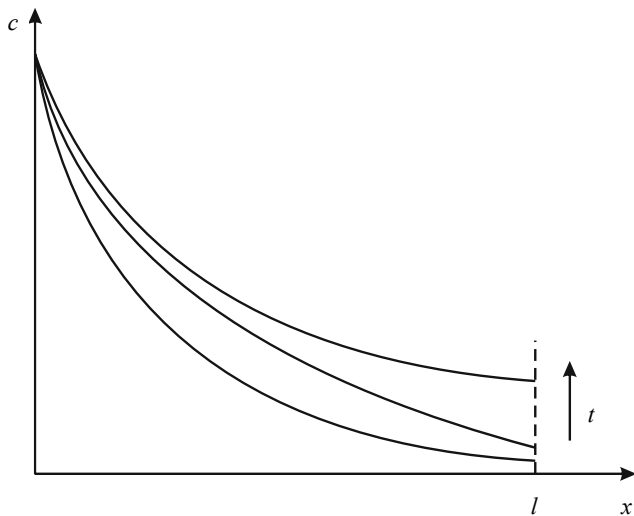


Рис. 7. Концентрационные профили водорода по толщине  $l$ . Средняя линия – в момент прохождения максимума на кривой выходного потока. Стрелкой показан ход времени  $t$

### Экспериментальные аспекты водородопроницаемости и аппаратурное оформление

Применение метода нестационарной проницаемости с приемником ограниченного объема подразумевает и *иное приборное оформление экспериментальных установок*.

Основным по сравнению с дифференциальными методами здесь является то, что *диапазон измерения давления в приемнике* (в терминах дифференциальных методов – парциального давления водорода) сдвинут из области высокого и сверхвысокого вакуума (от  $10^{-7}$  –  $10^{-8}$  Торр (предварительное вакуумирование) до  $\approx 10^{-5}$  Торр) в область среднего и низкого вакуума (при той же степени предварительной откачки – до порядка  $0,1 \div$  несколько десятков Торр, что может быть получено за приемлемое время эксперимента). Это имеет принципиальное значение в плане возможного повышения точности определения  $D$ . В дифференциальных методах почти повсеместно используются масс-спектрометры, которые, обладая высокой чувствительностью, имеют низкую точность [21–25]. Последнее обуславливается главным образом тем, что выходным электрическим сигналом любых масс-спектрометров являются

слабые ионные токи порядка  $10^{-8} - 10^{-12}$  А, которые, как следует из теории электрических измерений (например, [26, 27]), невозможно измерить точно. Усиление этих токов упрощает их регистрацию, но не уменьшает погрешность. Как известно, точно можно измерять только напряжение и частоту (мостовые и компенсационные схемы). В случае интегрального нестационарного метода в указанном диапазоне выходных давлений можно непосредственно применять такие высокоточные приборы, как баратрон (выходной электрический сигнал – частота, погрешность образцовых баратронов  $\pm(0,25\% - 0,05\%)$ ). Масс-спектрометры калибруются по ионизационным вакуумметрам (погрешность образцовых приборов  $\pm 10\%$  при  $10^{-7} - 10^{-1}$  Па и  $30\%$  ниже  $10^{-7}$  Па). За последнее время появились установки, в которых масс-спектрометры градуируются по баратронам с использованием редуцированных объемов (из-за разницы диапазонов измерений) [28, 29]. Это вполне оправдано в рамках тех задач, решению которых посвящены статьи, но ничего не добавляет в плане возможного увеличения точности определения  $D$ . Образцовые редуцированные установки, находящиеся в институтах метрологии, имеют погрешность  $\pm(3-9)\%$  [22]; это связано в основном с трудностью работы с калиброванными объемами. Также масс-спектрометры могут быть откалиброваны непосредственно по потоку через калиброванный капилляр. Точность образцовых потокомеров тоже невелика –  $\pm(5-10)\%$  [22]. Кроме этого, как известно, измерения в высоком вакууме сопряжены с огромными экспериментальными трудностями. В интегральных же методах большие количества измеряемого водорода и сравнительно высокие давления сводят на нет фоновые натекания и гажение со стенок, что является бичом дифференциальных методов. Однако при практической реализации нестационарной диффузии в малый приемный объем это обязательно должно быть доказано экспериментально с помощью холостых опытов. Особенно это касается водородопроницаемости при повышенных температурах.

Одним из факторов повышения точности измеряемых диффузионных параметров и в интегральных и в дифференциальных методах может стать *повышение точности измерения и регулирования температуры*, поскольку  $D$  и константа Сивертса зависят от нее по экспоненте. Применяемые ныне повсеместно термопары должны быть заменены на платиновые термометры сопротивления, погрешность которых на  $1,5-2$  порядка ниже [30, 31]. Точность индивидуально проградуированных термопар составляет реально  $\pm 7\%$ . При периодической градуировке по образцовым термометрам с применением комплекса соответствующих мер, она может быть повышена до  $\pm(1-2)K$ . Чтобы обеспечить такую точность, при измерениях необходимо поддерживать свободные концы термопар при  $0^\circ C$ , что создает дополнительные экспериментальные трудности. Термо-э.д.с. необходимо измерять потенциометрами по компенсационной схеме, которая неудобна для автоматизации. Погрешность же образцового платинового термометра сопротивления ПТС-10 составляет  $\pm 0,01 K$ ,

для рабочих термометров без труда можно получить точность  $\pm (0,05 - 0,1) K$ . Показания их не зависят от колебаний температуры окружающей среды, а измерительные схемы легко поддаются автоматизации. Платиновый термометр сопротивления является нормальным прибором МПТШ-68 в диапазоне от 273 до 923 К. Использовать рабочие термометры можно примерно до 1273 К. Следует учитывать, что при использовании платиновых термометров сопротивления требуются печи с достаточной изотермической зоной.

Еще одним важным аспектом является *геометрия экспериментальных установок, диффузионных ячеек и самих образцов*, так как такие величины, как толщина и площадь образцов, размеры входных резервуаров, приемных и измерительных объемов, могут или каким-то образом влиять на измеряемые параметры, или просто используются в расчетах при обработке данных. Во многих случаях требуется точное измерение значения объема того или иного резервуара. Измерение толщины образца, как правило, трудностей не вызывает; с определением площади дисковых образцов – сложнее, так как чаще всего они крепятся в диффузионной ячейке с помощью сварки, что может исказить их геометрию (неточность определения диаметра  $\pm 0,1$  мм может привести к погрешности определения площади образца  $\approx 1\%$ ). В дифференциальных методах приемники и измерительные объемы (если их несколько) как правило, велики и, следовательно, подвержены влиянию температуры окружающей среды. В интегральных методах приемный объем мал и легко может быть термостатирован.

## Заключение

В работе проведен сравнительный анализ дифференциального и интегрального вариантов метода проницаемости для определения диффузионных характеристик водорода в идеальных системах металл-водород. Проанализированы принципиальные основы самих методов, некоторые математические и экспериментальные аспекты их реализации, аппаратурные и конструкционные особенности соответствующих экспериментальных установок, с целью поиска возможностей повышения точности определения коэффициента диффузии. Показано, что интегральный метод нестационарного проникновения (7) объективно более информативен, чем метод установления стационарного потока; предполагает использование значительно более точных приборов для измерения давления водорода, более выгодную схему эксперимента и конструкцию узлов экспериментальной установки, чем дифференциальные методы, в общем. Однако пока этот метод имеет ограниченную сферу применения, для сравнения конкретных погрешностей его с другими методами пока не накоплен достаточный экспериментальный материал даже для случаев идеальных систем, и обладает лишь потенциалом повышения точности. С другой стороны, это может стать первым шагом, если метод будет совершенствоваться дальше.

## Список литературы

1. Водород в металлах / Под ред. Г. Алефельда и И. Фелькля. В 2-х томах. М.: Мир, 1981.
2. Взаимодействие водорода с металлами / Под ред. А. П. Захарова. М.: Наука, 1987.
3. Методические указания по определению высокотемпературной водородопроницаемости металлов. Академия наук СССР. Научный совет по проблеме «Новые процессы получения и обработки металлических материалов». Вторая редакция. Львов, 1981.
4. Ванькович Р. И., Семчишин И. В. Оценка точности измерения диффузионных постоянных газа в твердом теле // Изм. техн. 1975, № 8. С. 39–40.
5. Ванькович Р. И., Семчишин И. В. Некоторые систематические погрешности измерения диффузии газа в твердом теле // Физ.-хим. мех. мат. 1976. Т. 12, № 1. С. 55–60.
6. Похмурский В. И., Сидорак И. И., Пархета Р. Г. О методическом подходе к исследованию высокотемпературной водородопроницаемости металлов // Физ.-хим. мех. мат. 1982. Т. 18, № 4. С. 81–85.
7. Лобко В. Н., Бекман И. Н. Численный метод определения коэффициента диффузии газообразующей примеси в твердом теле по результатам интегрального варианта метода проницаемости // Журнал технической физики. 2010. Т. 80, № 9. С. 75–79.
8. Daynes H. A. The Process of Diffusion through a Rubber Membrane // Proc. Roy. Soc. 1920. Vol. A97. P. 286–307.
9. Barrer R.M. Permeation, diffusion and solution of gases in organic polymers. // Trans. Faraday Soc. 1939. V. 35. P. 628.
10. Barrer R. M. Gas Flow in Solids // Phil. Mag. 1939. Vol. 28. P. 148–162.
11. Barrer R. M. Stationary and non-stationary states of flow of hydrogen in palladium and iron // Trans. Faraday Soc. 1940. Vol. 36, N 12. P. 1235–1248.
12. Бэррер Р. Диффузия в твердых телах. М.: Гос. изд. иностр. лит. 1948.
13. Габис И. Е., Компаниец Т. Н., Курдюмов А. А., Поверхностные процессы и водородопроницаемость металлов. С. 177–208. В кн.: Взаимодействие водорода с металлами / Под ред. А. П. Захарова. М.: Наука, 1987.
14. Заика Ю. В. Идентификация модели водородопроницаемости металлов. Журн. техн. физ. 1998. Т. 68, № 11. С. 38–42.
15. Morrison H. M., Blackburn D. A., Chui K. M. A pressure oscillation method of studying gas diffusion in solids // J. Nucl. Mat. 1978. Vol. 67–70, N 1–2. P. 578–580.
16. Cummings D. L., Reuben R. L., Blackburn D. A. The Effect of Pressure Modulation on the Flow of Gas through a Solid Membrane: Permeation and Diffusion of Hydrogen through Nickel // Metall. Trans. A. 1984. Vol. 15A. P. 639–648.
17. Габис И. Е.. Метод концентрационных импульсов для исследования транспорта водорода в твердых телах. Журн. техн. физики, 1999. Т. 69. Вып. 1. С. 99–103.
18. Мусяев Р. К., Лебедев Б. С., Буснюк А. А., Гришечкин С. К. и др. Исследование явлений проницаемости и сверхпроницаемости металлов на установке «Прометей» // Взаимодействие изотопов водорода с конструкционными

материалами. ИИISM-01. Сборник докладов международного семинара. Саров: ВНИИЭФ, 2002. С. 228–240.

19. Пригожин И., Кондепуди Д. Современная термодинамика. От тепловых двигателей до диссипативных структур. М.: Мир, 2002.

20. Самарский А. А., Вабищевич П. Н. Численные методы решения обратных задач математической физики. Изд. 3. М.: Изд. ЛКИ, 2009.

21. Уэстон Дж. Техника сверхвысокого вакуума. М.: Мир, 1988.

22. Кузьмин В. В. Вакуумные измерения. М.: Издательство стандартов, 1992.

23. Кузьмин В. В. Градуировка и поверка вакуумметров. М.: Издательство стандартов, 1987.

24. Вакуумная техника. Справочник / Под ред. Е. С. Фролова и В. Е. Минайчева. М.: Машиностроение, 1992.

25. Розанов Л. Н. Вакуумная техника. М.: ВШ, 1982.

26. Электрические измерения. Средства и методы измерений / Под ред. Е. Г. Шрамкова. М.: ВШ, 1972.

27. Электрические измерения / Под ред. А. В. Фремке. М.: ВШ, 1973.

28. Русинов А. А., Гаспарян Ю. М., Перельгин С. Ф., Писарев А. А. и др. Стенд для термодесорбционных измерений. Приборы и техника эксперимента. 2009, № 6. С. 116–121.

29. Абрамов И. А., Дьянов Н. Ю., Казаковский Н. Т. Методические подходы в масс-спектрометрическом анализе изотопов водорода и гелия. Приборы и техника эксперимента. 2010, № 1. С. 125–127.

30. Куинн Т. Температура. М.: Мир, 1985.

31. Рогельберг И. Л., Бейлин В. М. Сплавы для термопар. Справочник. М.: Металлургия, 1983.