

УДК 539.217.5:51-73

**НОВАЯ ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ЗАВИСИМОСТЬ ТИПА  $\ln(1+\exp(x))$  ДЛЯ ЭМПИРИЧЕСКОГО ОПИСАНИЯ ПРОЦЕССА НАТЕКАНИЯ ВОДОРОДА ПРИ ЕГО ДИФФУЗИИ ЧЕРЕЗ МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ МЕМБРАНЫ**

*А.А. Семенов, И.Г. Лесина, А.С. Аникин, А.В. Лизунов, Е.В. Козлова, О.А. Кучеров*  
*АО «Высокотехнологический научно-исследовательский институт неорганических материалов имени академика А.А. Бочвара», Москва*  
*AASemenov@bochvar.ru*

*Разработана и математически обоснована новая эмпирическая модель для аппроксимации процесса натекания водорода при его диффузии через металлические мембраны. Она отличается простотой представления как в интегральном, так и в дифференциальном виде и позволяет с приемлемой точностью производить математическую обработку результатов диффузионного эксперимента при сильной зашумленности измеряемых величин давления, в частности, рассчитывать коэффициенты диффузии водорода и водородопроницаемость материалов.*

Ключевые слова: диффузия водорода, натекание водорода, мембраны, металлы, сплавы, аппроксимация, математическое моделирование, функциональная математическая зависимость, эмпирическая модель.

**A NEW FUNCTIONAL MATHEMATICAL DEPENDENCY TYPE  $\ln(1+\exp(x))$  FOR THE EMPIRICAL DESCRIPTION OF HYDROGEN INFLOW PROCESS DURING ITS DIFFUSION THROUGH METAL MEMBRANES**

*A.A. Semenov, I.G. Lesina, A.S. Anikin, A.V. Lizunov, E.V. Kozlova, O.A. Kucherov,*  
*JSC A.A. Bochvar High-Technology Research Institute of Inorganic Materials, Moscow*

*A new empirical model for approximating the hydrogen inflow process during its diffusion through metal membranes has been developed and mathematically substantiated. The model is characterized by its simplicity of representation in both integral and differential form and allows to perform mathematical processing of the diffusion experiment results with acceptable accuracy when the measured pressure values are very noisy, in particular, calculating the diffusion coefficients of hydrogen and water permeability of materials.*

Keywords: diffusion of hydrogen, hydrogen inflow, membranes, metals, alloys, approximation, mathematic simulation, mathematical functional dependency, approximation, empirical model.

Прогнозирование диффузионных свойств водорода в конструкционных материалах является важной задачей реакторного материаловедения. Для исследования диффузионных процессов, в частности, для определения водородопроницаемости

конструкционных материалов ядерных реакторов, наиболее широко используется мембранный метод [1].

Ранее нами была предложена функциональная математическая зависимость для аппроксимации диффузионного натекания водорода и его изотопов через металлические мембраны [2]. Она позволила проводить обработку результатов диффузионных экспериментов даже в случае сильно зашумленных и разрозненных экспериментальных данных [3, 4]. Однако модель, использованная в [2-4], отличается сложностью, особенно в её дифференциальном выражении. В связи с этим нами была рассмотрена новая, намного более простая функциональная математическая зависимость для аппроксимации этого процесса.

Настоящая работа посвящена эмпирической аппроксимации процесса натекания водорода при его диффузии через металлические мембраны. В ней новая функциональная математическая зависимость сопоставлена с той, что была использована в работах [2-4].

Мембранный метод определения водородопроницаемости конструкционных материалов основан на вычислении коэффициентов диффузии и растворимости водорода в них по экспериментальной зависимости давления водорода, натекающего в пространство за мембраной, от продолжительности контакта мембраны с водородом. Давление водорода измеряют в изначально вакуумированном принимающем контуре мембранной ячейки, в которую через тонкослойную мембрану поступает диффундирующий газ. С противоположной стороны мембраны, в отдающий контур мембранной ячейки, скачкообразно напускают водород, давление которого поддерживают там постоянным в течение всего эксперимента. Отсчёт времени начинают с момента напуска водорода в отдающий контур мембранной ячейки. Согласно стандарту, разработанному специалистами атомной отрасли для исследования водородопроницаемости реакторных материалов [1], подвергаться испытанию могут образцы конструкционных материалов, исполненные в виде цилиндрических или плоских мембран (рис. 1). Толщина мембраны выбирается минимальной, для сокращения времени эксперимента, но при этом мембрана должна быть устойчивой к перепаду давления между внешним и внутренним контурами установки. Для исключения натекания водорода в измерительный контур в обход мембраны, образец для испытания должен быть герметично сварен в диффузионную ячейку [2].

Эффективные коэффициенты диффузии водорода  $D_{эф}$  в исследуемых материалах по данным мембранного эксперимента согласно [1] определяют объёмнометрическим или динамическим вычислительными методами. В объёмнометрическом методе вычислений используют зависимость давления водорода в принимающем контуре  $P_H$  от времени. Динамический метод вычисления коэффициентов диффузии по данным мембранного эксперимента заключается в математической обработке зависимости

потока водорода через мембрану  $\Phi_H$  при подаче его на одну из её сторон от продолжительности мембранного эксперимента (рис. 2).

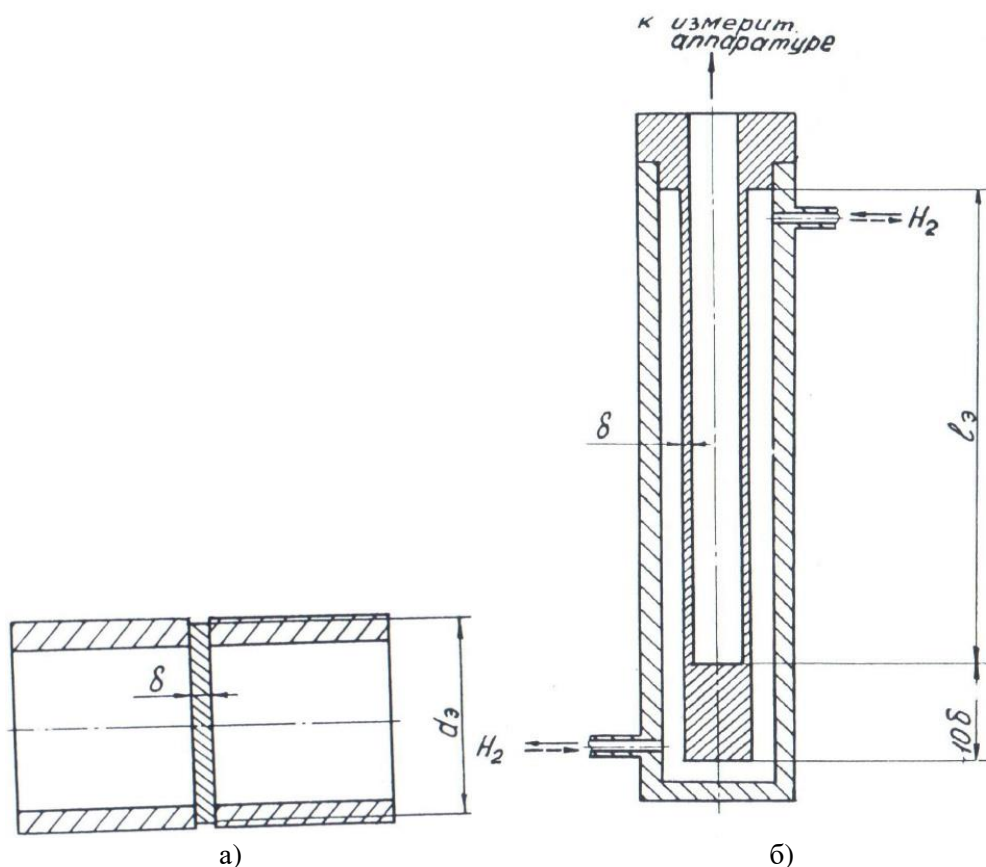


Рис. 1. Плоский (а) и цилиндрический образцы материалов для их диффузионных испытаний мембранным методом согласно [1]

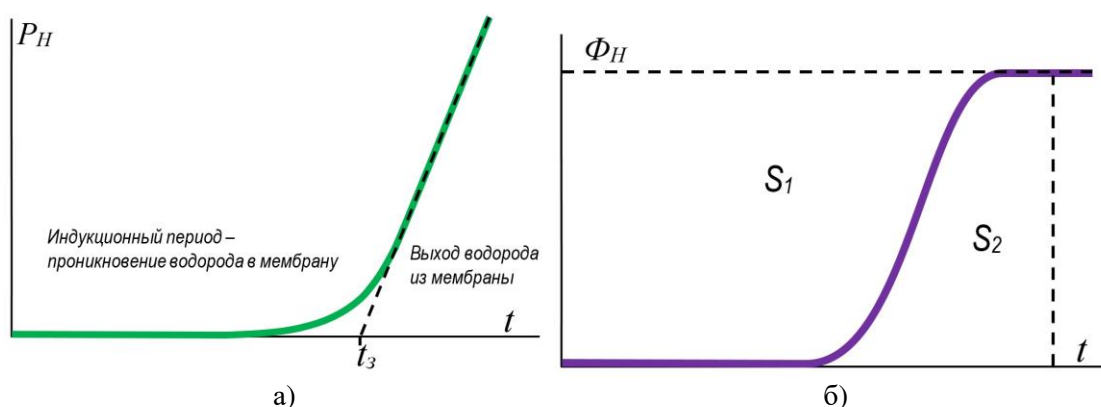


Рис. 2. Зависимость давления водорода в приёмной ёмкости (а) и потока водорода через мембрану (б) от продолжительности мембранного эксперимента

Для получения зависимости  $P_H$  от времени при заданной температуре эксперимента водород подают на входную (принимающую) сторону мембраны из исследуемого материала, а с другой стороны мембраны в принимающем контуре через определенные интервалы времени измеряют текущие величины давления водорода.

Точка пересечения касательной к прямой стационарных значений установившегося потока водорода с временной осью определяет время запаздывания  $t_3$ , по которому и рассчитывают коэффициенты диффузии водорода (рис. 2).

После выхода потока водорода через мембрану на стационарный режим выбирают одно из значений на временной оси, от которого строят прямоугольник так, как показано на рис. 2 (б). По построенной зависимости потока водорода через мембрану  $\Phi_H$  от времени контакта  $t$  определяют величины  $S_1$  (дополнительная к прямоугольнику площадь) и  $S_2$  (подынтегральная площадь), которые входят в формулу расчета эффективного коэффициента диффузии водорода.

Значение эффективных коэффициентов диффузии для объемнометрического метода,  $D_{\text{эф}}^o$  ( $\text{см}^2/\text{с}$ ), определяют по формуле (1) для плоских мембран и по формуле (2) для цилиндрических мембран:

$$D_{\text{эф}}^o = \frac{\delta^2}{6 \cdot t_3}, \quad (1)$$

где  $\delta$  – толщина образца, см;  
 $t_3$  – время запаздывания, с.

$$D_{\text{эф}}^o = \frac{R_1^2 - R_2^2 + (R_1^2 + R_2^2) \cdot \ln(R_2/R_1)}{4 \cdot t_3 \cdot \ln(R_2/R_1)}, \quad (2)$$

где  $R_1$  – внутренний радиус цилиндрического образца, см;  
 $R_2$  – внешний радиус цилиндрического образца, см.

Значение эффективных коэффициентов диффузии для динамического метода,  $D_{\text{эф}}^d$  ( $\text{см}^2/\text{с}$ ), определяют по формуле (3) для плоских мембран и по формуле (4) для цилиндрических мембран:

$$D_{\text{эф}}^o = \frac{\delta^2}{6 \cdot t_3} \cdot \frac{S_1 + S_2}{S_1}, \quad (3)$$

где  $S_1$  – дополнительная к прямоугольнику площадь, у.е.;  
 $S_2$  – подынтегральная площадь, у.е.;  
 $t_K$  – произвольное время, превышающее время стабилизации потока, с.

$$D_{\text{эф}}^d = \frac{R_1^2 - R_2^2 + (R_1^2 + R_2^2) \cdot \ln(R_2/R_1)}{4 \cdot t_3 \cdot \ln(R_2/R_1)} \cdot \frac{S_1 + S_2}{S_1} \quad (4)$$

Для плоских образцов эффективный коэффициент водородопроницаемости,  $P_{\text{эф}}$  ( $\text{см}^3 \cdot \text{см}/(\text{с} \cdot \text{см} \cdot \text{Па}^{0.5})$ ), определяют по формуле (5):

$$P_{\text{эф}} = \frac{\Phi_{\text{H}} \cdot \delta}{S_{\text{э}} \cdot P^{\alpha}} \quad (5)$$

Для цилиндрических образцов эффективный коэффициент водородопроницаемости вычисляли по формуле (6):

$$P_{\text{эф}} = \frac{\Phi_{\text{H}} \cdot (R_2 - R_1)}{\pi \cdot (R_2 + R_1) \cdot l_{\text{э}} \cdot P^{\alpha}} \quad (6)$$

В формулах (5) и (6) использованы следующие обозначения:

$\Phi_{\text{H}}$  – поток водорода через образец, см<sup>3</sup>/с;

$S_{\text{э}}$  – эффективная площадь образца, см<sup>2</sup>;

$l_{\text{э}}$  – эффективная длина образца, см;

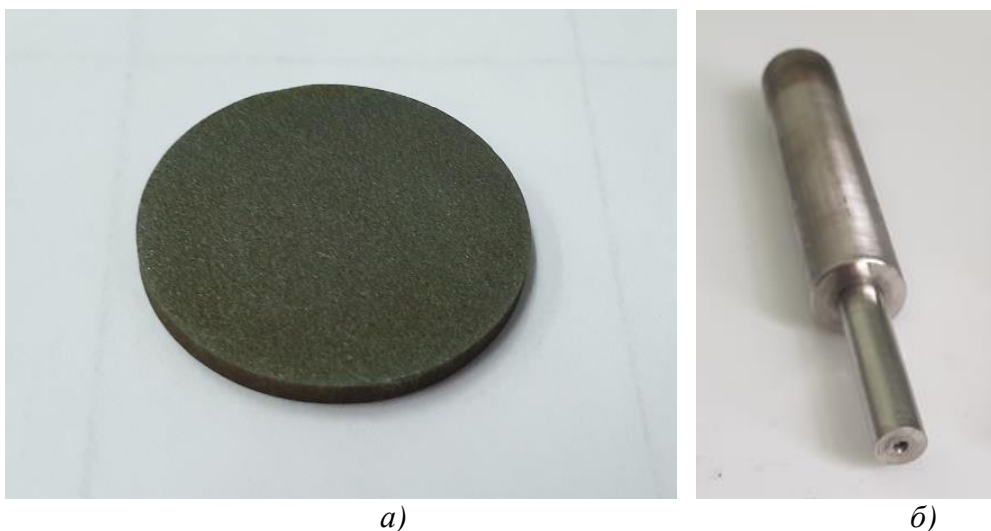
$P$  – давление газообразного водорода на входной стороне, Па;

$\alpha$  – показатель степени ( $\alpha = 0,5$ ).

Эффективная растворимость водорода в материале,  $S_{\text{эф}}$  (см<sup>3</sup>/(см<sup>3</sup>·Па<sup>0,5</sup>)), может быть определена по формуле:

$$S_{\text{эф}} = \frac{P_{\text{эф}}}{D_{\text{эф}}} \quad (7)$$

При проведении мембранных экспериментов в АО «ВНИИНМ» имени академика А.А. Бочвара для определения водородопроницаемости перспективных реакторных материалов были использованы мембранные ячейки как с плоской, так и с цилиндрической мембранами (рис. 3).



а) плоская мембрана из ХН80МТЮ (до полировки)  
б) цилиндрическая мембрана из никеля НП2

Рис. 3. Внешний вид образцов для определения диффузионных характеристик изотопов водорода мембранным методом

На цилиндрических мембранах диффузия водорода в ходе эксперимента протекала снаружи внутрь мембраны. Рабочее давление газа на входной стороне образца поддерживали постоянным, так, что колебания давления на входе не превышало в течение всего эксперимента 5%. Уровень фонового газовыделения определяли при проведении холостого эксперимента, без использования водорода и он не превышал 10% от величины потока водорода на выходной стороне. Для проведения испытаний были разработаны чертежи, по которым были изготовлены образцы для диффузионных испытаний из никеля НП2 и сплава на основе никеля ХН80МТЮ – основного кандидатного материала для изготовления трубопроводов и других конструкций жидко-солевых реакторов. Для достижения глубокого вакуума на установке по определению диффузии водорода мембранным способом всех газопроводы магистрали установки предварительно прогревали, одновременно откачивая их с помощью высоковакуумного поста. В качестве запорной арматуры применяли водородные приварные сильфонные вентили, рассчитанные для работы при давлении до 16 МПа и температурах до 200 °С. Прогрев мембранных аппаратов производили лабораторными печами шахтного типа. Режим их нагрева программировали контроллером температуры ТРМ-148. Давление молекулярного водорода в отдающем и в принимающем контурах мембранных аппаратов измеряли с помощью емкостных датчиков типа «Баратрон» с блоком питания и индикации PR4000, подсоединенных к управляющему компьютеру.

После достижения процессом диффузии водорода стационарного режима экспериментально определяемые величины давления водорода хорошо аппроксимируются линейной зависимостью от времени контакта мембраны с водородом (рис. 2а) по методу наименьших квадратов. Так в процессе объемнометрического метода обработки результатов эксперимента определяли время запаздывания  $t_3$ , которое использовали в формулах (1-4) при расчетах диффузионных характеристик.

Динамический метод требует использования функции зависимости потока водорода  $\Phi_H$  от времени (рисунок 2б), которая линейно связана с первой производной по времени зависимости давления водорода в приемном контуре мембранной ячейки. При определении потока водорода  $\Phi_H$  возникла необходимость в нахождении удобной для аппроксимации и дифференцирования эмпирической модельной функции зависимости давления водорода в приемном контуре от времени, которая бы позволила сгладить флуктуации, при этом полностью отражая характерные особенности и сохраняя физический смысл диффузионного процесса.

В качестве такой функции в работах [2-4] использовали выражение (8).

$$P_H(t) = \frac{A \cdot t - B}{1 - \left(\frac{B}{A \cdot t}\right)^N} \quad (8)$$

После дифференцирования выражения (8) по  $t$  и умножения результата на

коэффициент  $K_H$  получили функцию потока водорода через мембрану  $\Phi_H(t)$ , зависимость его величины от продолжительности эксперимента (9):

$$\Phi_H(t) = K_H \cdot \frac{A \cdot \left[1 - \left(\frac{B}{A \cdot t}\right)^N\right] - (A \cdot t - B) \cdot \left(\frac{B}{A}\right)^N \cdot \frac{N}{t^{N+1}}}{\left[1 - \left(\frac{B}{A \cdot t}\right)^N\right]^2} \quad (9)$$

Функциональная зависимость (8) была использована также при разработке математической модели для аппроксимации S-образных зависимостей, характерных для различных физико-химических процессов, в частности, для описания процесса термического разложения гидрида бериллия [5].

Недостатками предложенной в [2-4] модели является сложность её представления в дифференциальном виде по уравнению [9] и наличие разрыва с неопределённостью типа  $\frac{0}{0}$  при времени эксперимента равном  $\frac{B}{A}$ .

Вместе с тем, представленная на рис. 2а зависимость давления водорода в приёмной ёмкости мембранной ячейки от продолжительности эксперимента имеет сходство с другой, более простой, чем выражение (8), математической функцией типа (10), чей график представлен на рис. 4.

$$f(x) = \ln(e^x + 1) \quad (10)$$

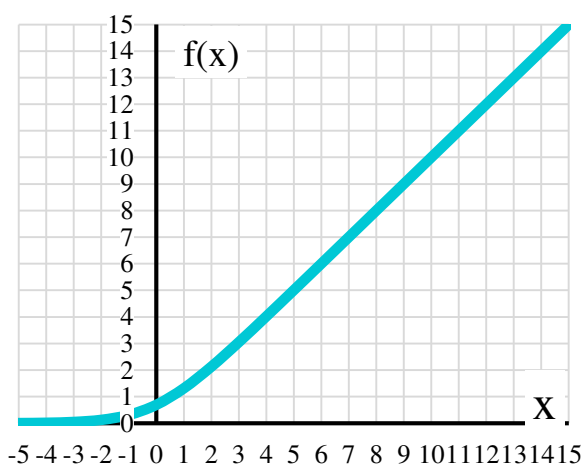


Рис. 4. График функциональной зависимости (10)

В отличие от использованной ранее функциональной зависимости (8), выражение (10) не имеет точек разрыва и определена в диапазоне значений аргумента от  $-\infty$  до  $+\infty$ . Так же, как и в случае с зависимостью (8), в левой части график выражения (10) стремится к нулю, а в правой части асимптотически стремится к наклонной линейной зависимости. Производная функции (10), в отличие от выражения (9), имеет очень простой вид (11), удобный для вычислений.

$$f'(x) = \frac{e^x}{e^x + 1} \quad (11)$$

При нулевом значении аргумента выражение (10) принимает значение  $\ln 2$ , а уравнение асимптоты имеет вид  $f(x)=x$ . Для практического использования функций (10) и (11) в качестве математических моделей необходимо было внести в них дополнительные параметры, позволяющие перемещать их вдоль оси  $OX$ , изменять угол наклона асимптоты и минимальный радиус кривизны для графика уравнения (10). Легко видеть, что, умножая аргумент  $x$  в выражении (10) на различные коэффициенты, мы получим семейство функций, пересекающих ось  $OY$  в одной и той же точке  $(0; \ln 2)$ , но имеющие различные углы наклона асимптот (рис. 5).

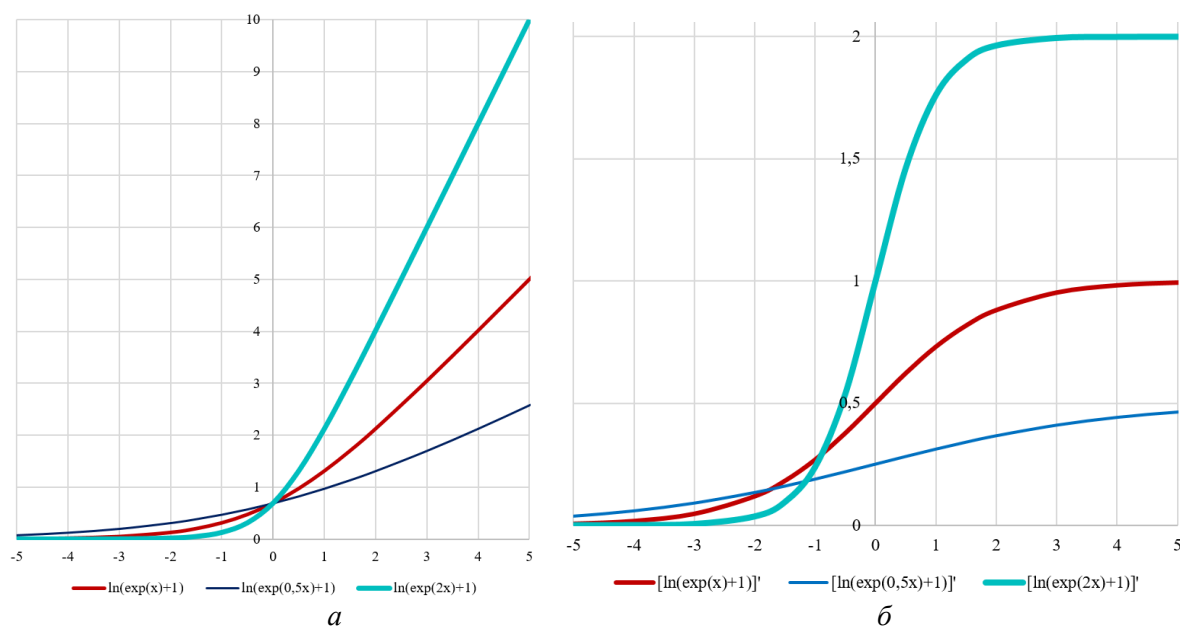


Рис. 5. Семейство функций с общим пересечением оси  $OY$ , но с различным углом наклона асимптоты (а), и их производные (б)

Если к аргументу экспоненты в выражении (10) добавлять различные слагаемые, то результатом будет семейство функций с графиками одного и того же вида, но смещёнными влево или вправо вдоль оси  $OX$  (рис. 6)

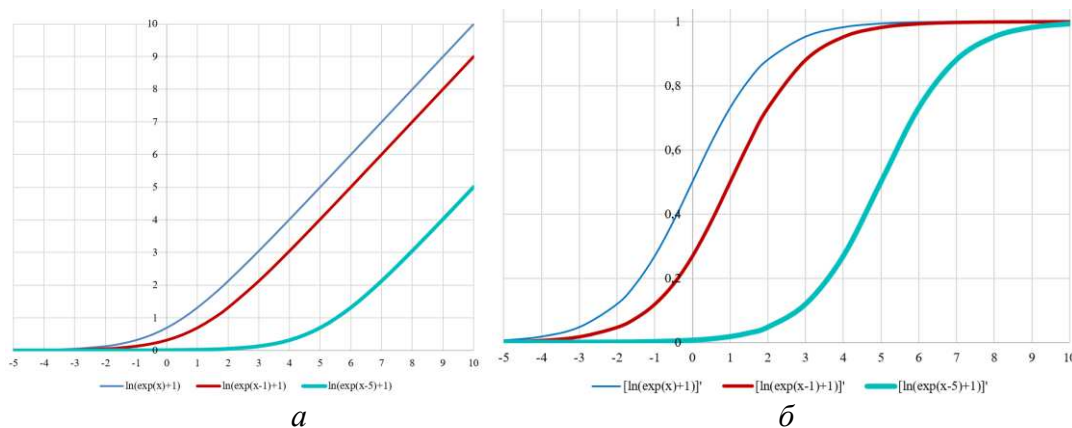


Рис. 6. Семейство функций со смещением по оси  $OX$  (а) и их производные (б)

При умножении на постоянный коэффициент всего выражения (10) мы одновременно изменим и угол наклона асимптоты, и сместим точку пересечения графика функции с осью  $OY$ . Однако, если при этом делить на тот же самый коэффициент аргумент выражения (10), то полученное семейство функций будет иметь одну и ту же асимптоту, но пересекать ось  $OY$  в различных точках, то есть иметь различные радиусы кривизны (рис. 7).

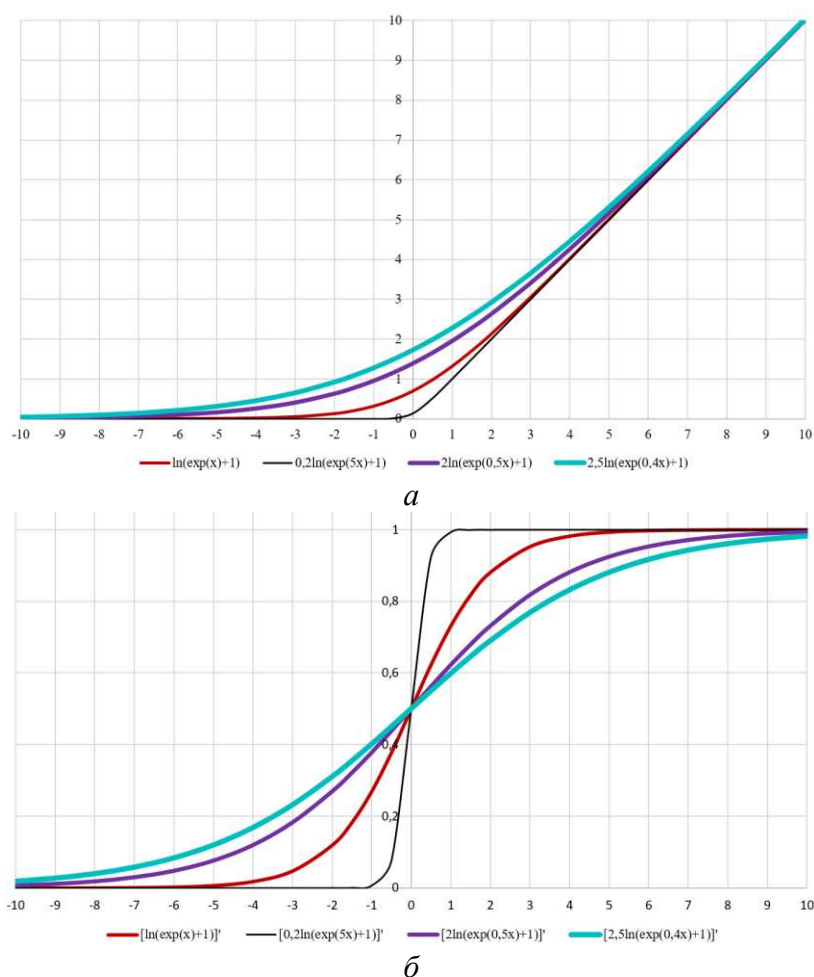


Рис. 7. Семейство функций различной крутизны, имеющих общую наклонную асимптоту (а) и их производные (б)

Умножение экспоненты в выражении (10) на постоянный коэффициент приведёт к тому же результату, что и добавление постоянного слагаемого к аргументу – сместит график функции вдоль оси  $OY$ , как на рис. 6. Все прочие преобразования функции (10) приведут к таким её искажениям, что она уже не сможет быть использована в качестве модели для отражения характера изменения давления в приёмной ёмкости мембранной ячейки при натекании в неё водорода.

Таким образом, после несложной калибровки выражение (10) может быть использовано для представления зависимости давления водорода от продолжительности мембранного эксперимента и приведено к такому виду, чтобы асимптота его совпадала с уравнением установившейся диффузии в мембранном

эксперименте  $P_H(t)=At-B$  и оставался ещё дополнительный фактор  $K$ , с помощью которого можно было бы управлять крутизной перехода горизонтального участка зависимости в её наклонный участок. Так было получено выражение (12), отражающее изменение давления водорода в приёмной ёмкости  $P_H$  мембранной ячейки от времени  $t$ .

$$P_H(t) = \frac{1}{K} \ln \left[ e^{AK \left[ t - \frac{B}{A} \right]} + 1 \right] \quad (12)$$

Аналитическое дифференцирование выражения (12) позволяет получить выражение зависимости потока водорода через мембрану от продолжительности эксперимента (13).

$$\Phi_H(t) = K_H \cdot \frac{Ae^{AK \left[ t - \frac{B}{A} \right]}}{1 + e^{AK \left[ t - \frac{B}{A} \right]}} \quad (13)$$

где  $K_H$  – коэффициент перевода давления водорода в его количество,

$A$  и  $B$  – соответственно коэффициент и свободный член линейной регрессии установившегося процесса диффузии водорода  $P_H(t)=At-B$ ;

$K$  – коэффициент, характеризующий крутизну перехода процесса диффузии водорода в стационарный режим.

Новые математические модели (12) и (13) были нами применены для аппроксимации двух серий диффузионных экспериментов с плоскими и цилиндрическими мембранами. По наклонному участку зависимости давления водорода от времени для установившегося процесса диффузии методом наименьших квадратов находили величины  $A$  и  $B$  модели (12), а потом находили величину параметра  $K$ , при котором сумма квадратов отклонений модельных величин давления от экспериментальных была минимальна.

Для сравнения те же самые данные были аппроксимированы модельными функциями, предложенными нами ранее в [3], в соответствии с представленным в [3] алгоритмом по формулам (8) и (9).

Сопоставление двух математических моделей процесса натекания водорода в приёмную ёмкость и потока водорода представлено на рис. 8-11 и в табл. 1, 2 применительно к экспериментальным данным, полученным в АО «ВНИИНМ».

При расчёте коэффициентов корреляции модельных величин с экспериментальными (табл. 1 и 2) использовали только данные, находящиеся на начальном участке временной зависимости, вплоть до момента, когда величина потока водорода через мембрану достигала 0,95% его максимальной величины.

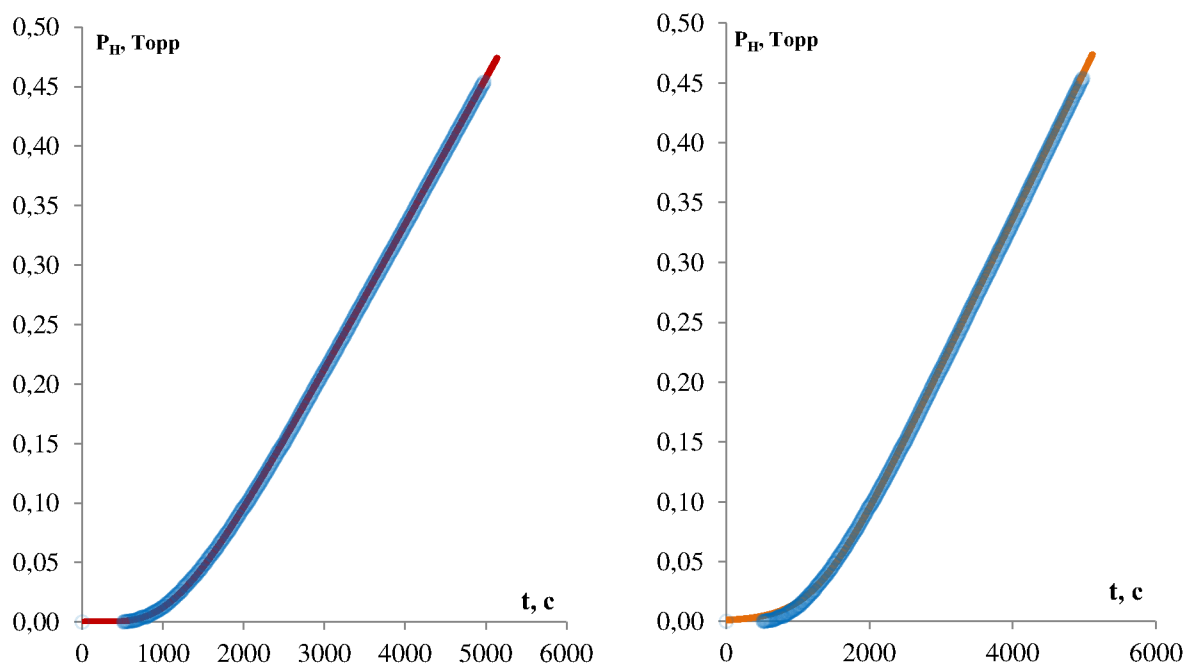


Рис. 8. Аппроксимация данных по давлению водорода в принимающем контуре после его диффузии через плоскую мембрану при 450 °С (синие маркеры).

Слева, красная линия – по модели (8), справа, оранжевая линия – по модели (12).

Площадь мембраны из сплава ХН80МТЮ – 2,84 см<sup>2</sup>, толщина 0,154 мм. Объем принимающего контура мембранной ячейки 62,7 см<sup>3</sup>, давление водорода в отдающем контуре 100,4 кПа

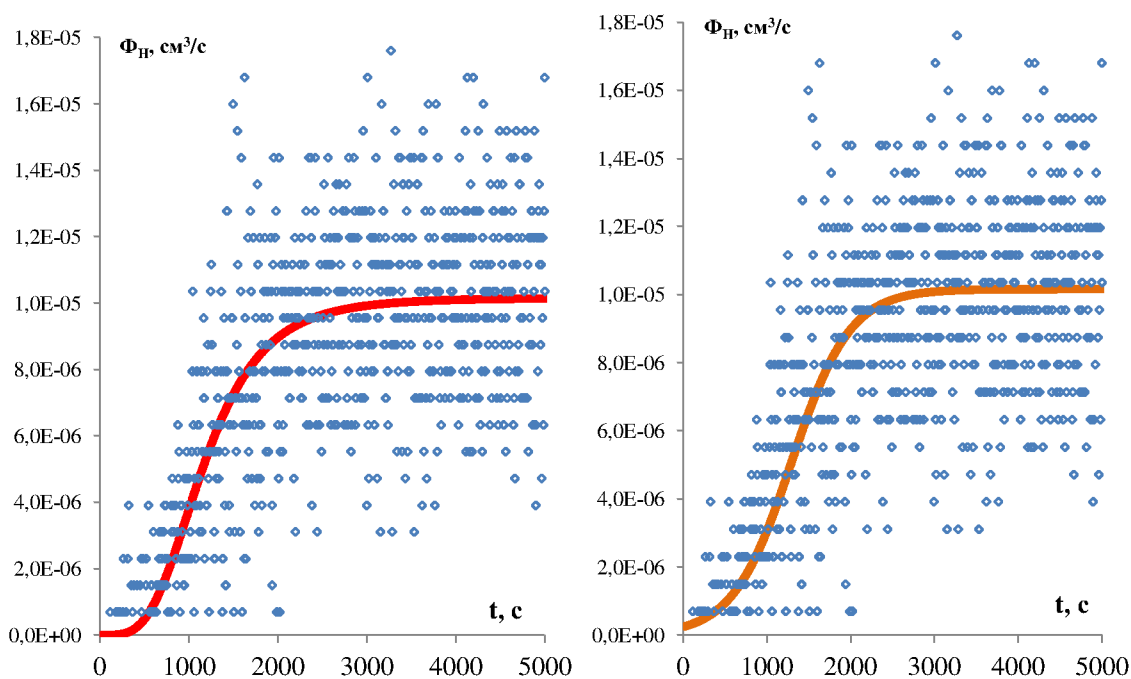


Рис. 9. Аппроксимация экспериментальных данных по потоку водорода через плоскую мембрану при 450 °С (синие маркеры).

Слева, красная линия – по модели (9), справа, оранжевая линия – по модели (13).

Площадь мембраны из сплава ХН80МТЮ – 2,84 см<sup>2</sup>, толщина 0,154 мм. Объем принимающего контура мембранной ячейки 62,7 см<sup>3</sup>, давление водорода в отдающем контуре 100,4 кПа.

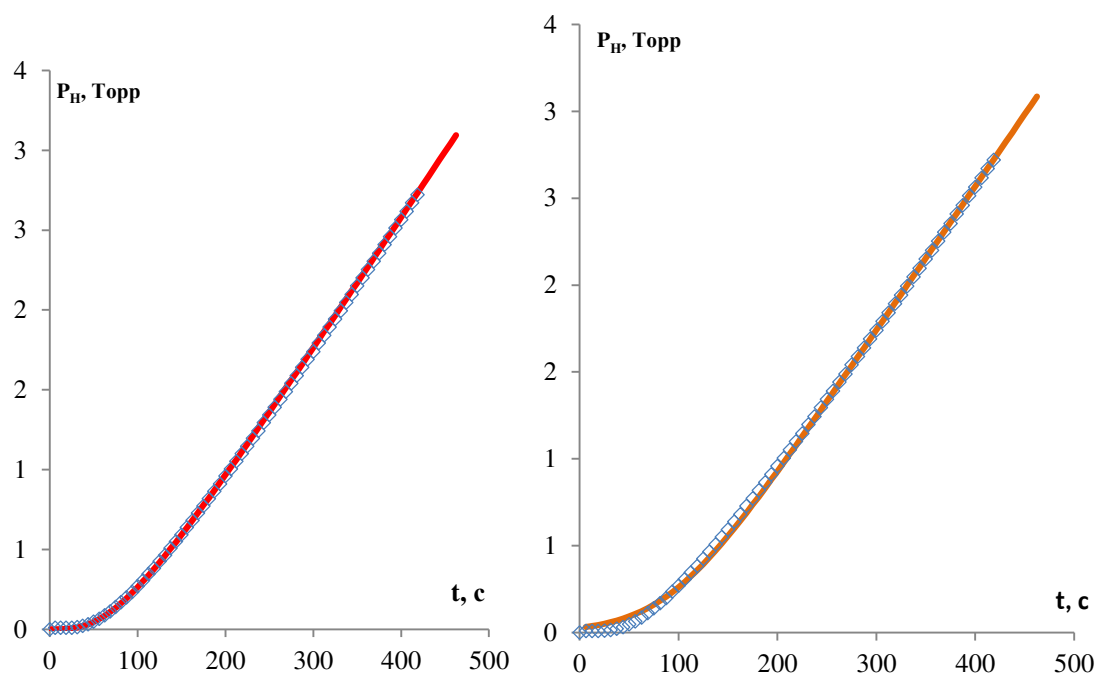


Рис. 10. Аппроксимация данных по давлению водорода в принимающем контуре после его диффузии через цилиндрическую мембрану при 476 °С (синие маркеры).

Слева, красная линия – по модели (8), справа, оранжевая линия – по модели (12).

Внешний радиус мембраны из никеля НП2 4,4 мм, высота 3 см, толщина 0,35 мм. Объем принимающего контура мембранной ячейки 60,5 см<sup>3</sup>, давление водорода в отдающем контуре 100,9 кПа.

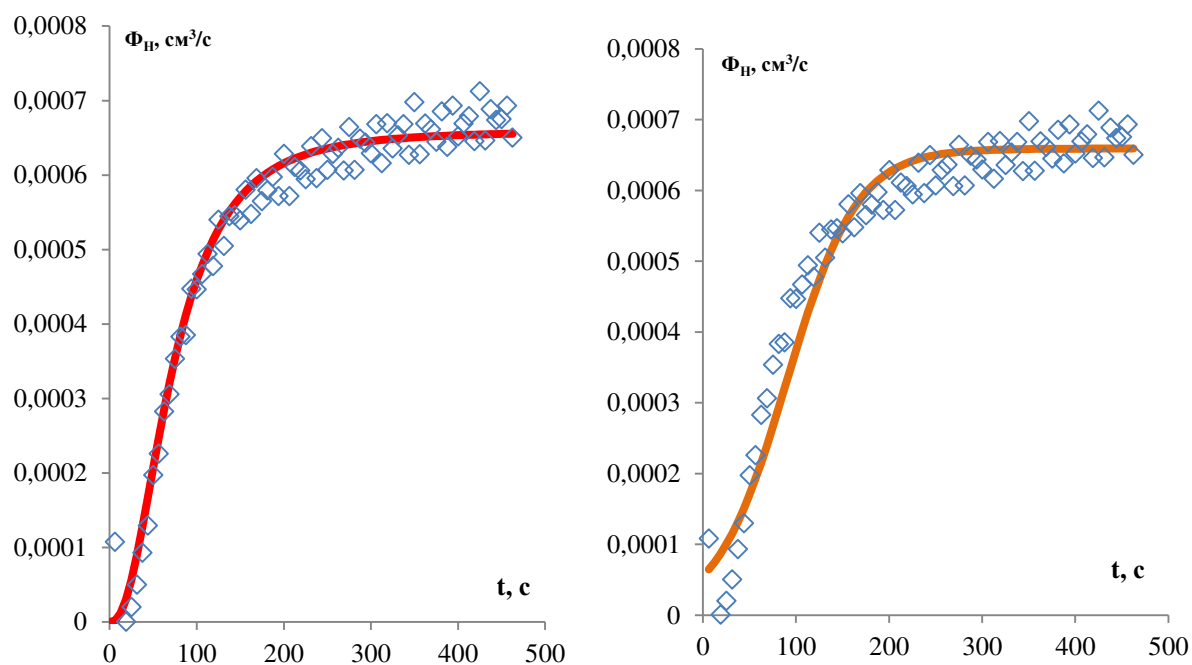


Рис. 11. Аппроксимация экспериментальных данных по потоку водорода через цилиндрическую мембрану при 476 °С (синие маркеры).

Слева, красная линия – по модели (9), справа, оранжевая линия – по модели (13).

Внешний радиус мембраны из никеля НП2 4,4 мм, высота 3 см, толщина 0,35 мм. Объем принимающего контура мембранной ячейки 60,5 см<sup>3</sup>, давление водорода в отдающем контуре 100,9 кПа

Таблица 1

Коэффициенты корреляции рассчитанных величин с экспериментальными данными по диффузии водорода для плоских мембран из сплава ХНМ80МТЮ

№	Температура, °С	Корреляция давления водорода $P_H$ (Торр) с расчётом по уравнению (8)	Корреляция потока водорода $\Phi_H$ (см <sup>3</sup> /с) с расчётом по уравнению (9)	Корреляция давления водорода $P_H$ (Торр) с расчётом по уравнению (12)	Корреляция потока водорода $\Phi_H$ (см <sup>3</sup> /с) с расчётом по уравнению (13)
1	450	0,99959	0,57317	0,99519	0,53936
2	520	0,92719	0,78425	0,99661	0,80485
3	600	0,99979	0,97248	0,99631	0,94836
4	670	0,99990	0,99137	0,99480	0,96591
5	750	0,99939	0,99440	0,99582	0,96965

Таблица 2

Коэффициенты корреляции  $R^2$  рассчитанных величин с экспериментальными данными по диффузии водорода для цилиндрических мембран из никеля НП2

№	Температура, °С	Корреляция давления водорода $P_H$ (Торр) с расчётом по уравнению (8)	Корреляция потока водорода $\Phi_H$ (см <sup>3</sup> /с) с расчётом по уравнению (9)	Корреляция давления водорода $P_H$ (Торр) с расчётом по уравнению (12)	Корреляция потока водорода $\Phi_H$ (см <sup>3</sup> /с) с расчётом по уравнению (13)
1	425,6	0,99860	0,98115	0,98531	0,87231
2	476	0,99978	0,98195	0,99144	0,93057
3	532	0,99985	0,98775	0,94346	0,85581
4	548	0,99806	0,99223	0,99091	0,93270
5	550	0,99947	0,97687	0,98800	0,90089
6	554	0,99734	0,99301	0,99526	0,95471
7	598	0,99997	0,95263	0,98800	0,91126
8	598,3	0,99767	0,99379	0,98321	0,91440
9	598,7	0,99824	0,98513	0,99068	0,92297

### Обсуждение результатов

По величине рассчитанных коэффициентов корреляции легко видеть, что новая математическая модель намного лучше аппроксимирует данные диффузионных экспериментов с плоскими мембранами, чем с цилиндрическими. С её помощью успешно можно обрабатывать сильно зашумлённые результаты, такие как на рис. 9,

получая сглаженные зависимости величин потока водорода и его давления в приёмной ёмкости от продолжительности эксперимента. Закономерно, что величины потока водорода, являясь дифференциальными величинами, при сопоставлении модели с экспериментом показывают меньшие величины коэффициентов корреляции, чем величины давлений водорода в приёмной ёмкости (табл. 1, 2), из-за шума, возникающего при численном дифференцировании экспериментальных результатов.

Сопоставление двух рассмотренных выше моделей между собой говорит о том, что почти во всех случаях первая модель даёт более точную аппроксимацию экспериментальных данных, чем функция типа  $\ln(\exp(x)+1)$ . Недостатком новой модели является то, что на начальном её участке рассчитанная по уравнению (9) величина потока водорода всегда отличается от нуля. Иногда это отклонение от нуля достаточно велико и приводит к существенной потере точности аппроксимации, как в случае, представленном на рис. 11 для эксперимента с цилиндрическими мембранами. В связи с этим, несмотря на такие достоинства функции типа  $\ln(\exp(x)+1)$  как её простота и отсутствие точки разрыва с неопределённостью типа  $0/0$ , следует признать, что разработанная ранее функция для аппроксимации данных диффузионного мембранного эксперимента по уравнениям (8) и (9) даёт более качественную аппроксимацию, чем аппроксимация по формулам (12) и (13). Тем не менее, коэффициенты диффузии водорода и водородопроницаемость исследованных конструкционных материалов, рассчитанные с использованием новой аппроксимирующей функции, полностью совпали с величинами, полученными нами ранее, и с литературными данными [6, 7], что свидетельствует о возможности её практического использования.

### Выводы

Таким образом, разработана и математически обоснована новая функциональная математическая зависимость типа  $\ln(\exp(x)+1)$ , позволяющая аппроксимировать процесс натекания водорода при его диффузии через металлические мембраны. На примере экспериментальных данных, полученных для мембран из никеля НП2 и сплава ХН80МТЮ, показана возможность её использования для расчёта потока водорода через конструкционные материалы по зависимости давления водорода в приёмной части мембранной ячейки от продолжительности эксперимента, даже в случае сильной зашумлённости экспериментальных данных. Показано, что данные диффузионных экспериментов с плоскими мембранами новая математическая модель аппроксимирует лучше, чем в случае с цилиндрическими мембранами.

### Список литературы

1. ОСТ 95 10447-91 *Материалы ядерных реакторов конструкционные. Метод исследовательских реакторных испытаний на водородопроницаемость*. Москва, 1992, -25 с.
2. Семенов А.А., Аникин А.С., Лизунов А.В., Букин А.Н., Беляков М.И., Забирова Н.Е., Крюкова А.С., Лесина И.Г., Козлова Е.В. *Аппроксимация процесса натекания водорода при его диффузии*

через металлические мембраны // Вопросы атомной науки и техники. Сер.: Материаловедение и новые материалы. 2021. Выпуск 4 (110). С. 23-35.

3. А.С. Аникин. Определение диффузионных характеристик трития в конструкционных и функциональных материалах реакторных установок различных типов. Диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук. М.: АО «ВНИИИМ», 2024.

4. А.С. Аникин, А.А. Семенов, О.А. Кучеров. Сопоставление функциональных математических зависимостей для описания процесса натекания водорода в мембранном эксперименте // Сборник тезисов докладов 8-й Международной конференции «Взаимодействие изотопов водорода с конструкционными материалами» и 17-й Международной Школы молодых ученых и специалистов имени А.А. Курдюмова «Взаимодействие изотопов водорода с конструкционными материалами» (IHISM-2024). – Саров, 2024.

5. Семенов А.А., Козлова Е.В., Горлевский В.В., Шевердяев М.С. Выбор функциональной математической зависимости для эмпирического описания процесса термического разложения гидрида бериллия // Вопросы атомной науки и техники. Сер.: Материаловедение и новые материалы. 2023. Выпуск 3 (119). С. 42-64.

6. Галактионова Н.А. Водород в металлах. М.: Металлургия, 1967.

7. Физические величины. Справочник. Под ред. И.С. Григорьева и Е.З. Мейлихова. Москва, Энергоатомиздат, 1991 г., -1232 с.