

## Исследования в обоснование усовершенствованного электрохимического датчика водорода в натрии

В.В. Алексеев, В.В. Борисов, А.А. Камаев, Н.С. Ганичев, В.Г. Саванков

АО «ГНЦ РФ – ФЭИ»,

249033 Россия, Калужская обл., г. Обнинск, пл. Бондаренко, 1

**Реферат.** Контроль содержания водорода в натрии – одна из важных задач обеспечения безопасности при эксплуатации реакторной установки с реактором на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем. Своевременная индикация малой течи дает возможность обеспечения локализации аварии до разрушения трубок парогенератора. Ключевым элементом системы контроля содержания водорода является датчик, непрерывно измеряющий концентрацию водорода в натрии. Рассмотрена конструкция и принцип работы электрохимического датчика водорода в натрии. Предложено полуэмпирическое выражение для расчета ЭДС, учитывающее два коэффициента:  $k_1$ , связанный с давлением паров воды в паровой камере, и  $k_2$ , характеризующий отклонение от идеальности кислородного датчика. Экспериментальные данные показали значительный разброс значений  $k_1$ , что подтверждает неполноту стабилизации паров воды. Небольшое различие в значениях коэффициентов  $k_2$  для разных блоков с электрохимическим датчиком обусловлено индивидуальными особенностями установленных на них электрохимических кислородных элементов. Рассмотрена усовершенствованная конструкция датчика с палладиевой мембраной, разделяющей паровую камеру и камеру с никелевой мембраной. Выполнены расчеты динамики изменения давления водорода в паровой камере для датчика с никелевой мембраной и его усовершенствованной модификации. Определено время достижения 67% от равновесного давления водорода при различных соотношениях объемов камер. Показано, что при объемах камер менее 1 мл и отношении площадей мембран  $S_1/S_2 < 20$  использование палладиевой мембраны не приводит к снижению инерционности, но предотвращает окисление никелевой мембраны за счет блокировки паров воды. Результаты могут быть использованы для оптимизации конструкции ЭХДВ-Н в системах автоматической защиты парогенератора в составе РУ с реактором БН в целях снижения инерционности и увеличения срока службы датчиков.

**Ключевые слова:** датчик водорода в натрии, датчик кислорода в натрии, чувствительный элемент, твердый электролит, электрод сравнения, никелевая мембрана, парциальное давление водорода, электрохимический датчик, ЭДС, пароводяная камера, реактор БН, парогенератор, палладиевое покрытие, система автоматической защиты парогенератора, термодинамическая активность, эмпирические коэффициенты.

**Для цитирования:** Алексеев В.В., Борисов В.В., Камаев А.А., Ганичев Н.С., Саванков В.Г. Исследования в обоснование усовершенствованного электрохимического датчика водорода в натрии. *Известия вузов. Ядерная энергетика*. 2026;2:70–82. DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2026.2.05>

## Введение

Безопасная работа натриевых контуров ЯЭУ обеспечивается поддержанием допустимого уровня содержания примесей в теплоносителе, основными из которых являются кислород и водород. Для успешной работы системы автоматической защиты парогенераторов натрий-вода [1] необходимо непрерывно контролировать содержание кислорода или водорода в натрии. В настоящее время с целью измерения водорода в натрии используются электрохимические датчики водорода.

Интенсификация разработок датчиков водорода в натрии последовала после принятия решения о создании системы контроля малых течей воды в натрий парогенератора установки БН-800, предусматривающего замену индикаторов типа ИВА на электрохимические датчики водорода [2]. Исследования показывают, что электрохимические датчики (ЭХДВ) имеют достаточно высокие технические характеристики по чувствительности и ресурсу.

В датчике водорода типа ЭХДВ в качестве чувствительного элемента (ЧЭ) используется электрохимический твердоэлектродный ( $ZrO_2 \cdot Y_2O_3$ ) датчик кислорода с промежуточной пароводяной камерой и водородопроницаемой мембраной. Принцип действия и зависимость ЭДС датчика от содержания водорода в измеряемой среде рассмотрены в [3].

## Конструкция и оценки электрохимического датчика электродвижущей силы (ЭДС) для измерения содержания водорода в натрии

На рисунке 1 приведена конструкция одной из модификаций ЧЭ датчика водорода. Датчик кислорода состоит из керамической пробирки 6, в дно которой герметично встроены цилиндрический элемент 2 из твердого электролита  $ZrO_2 \cdot Y_2O_3$ . На торцевую поверхность электролита, обращенную к пароводяной камере, нанесено «прозрачное» для водорода платиновое покрытие, являющееся катализатором и электродом (электрически соединено с корпусом). Внутри пробирки находится электрод

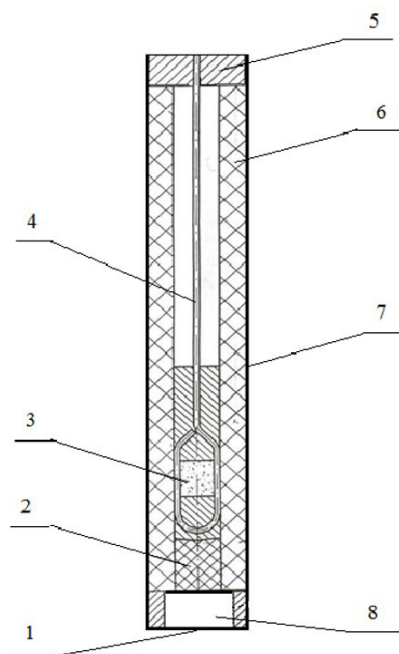


Рис. 1. Конструкция чувствительного элемента электрохимического датчика водорода: 1 – мембрана; 2 – твердый электролит; 3 – электрод сравнения; 4 – потенциальный вывод; 5 – изолятор; 6 – пробирка; 7 – корпус; 8 – паровая камера

сравнения 3 и потенциальный вывод 4. С пробиркой герметично соединены стальной корпус 7 и пароводяная камера 8 с приваренной никелевой мембраной 1.

Схема чувствительного элемента датчика водорода представлена на рис. 2.

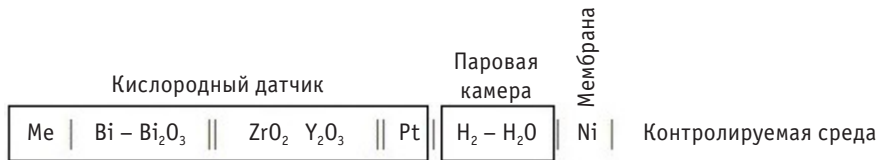


Рис. 2. Схема чувствительного элемента датчика водорода

В стационарном состоянии постоянная концентрация водорода в натрии и парциальное давление водорода в рабочей (паровой) камере уравновешены. При повышении концентрации водорода в натрии образуется разность концентраций водорода в натрии и рабочей камере, вследствие чего начинается диффузия водорода через мембрану в рабочую камеру датчика.

На поверхности мембраны со стороны рабочей камеры протон водорода принимает электрон, образуется атом водорода, атомы водорода при рекомбинации образуют молекулу водорода, которая диффундирует в объем камеры.

Поступившие в камеру молекулы водорода смешиваются с водяным паром и кислородом и по реакции (1) устанавливается новое парциальное давление кислорода.



Повышение концентрации водорода приводит к уменьшению парциального давления кислорода в рабочей камере, так как при неизменной температуре парциальное давление паров воды в рабочей камере поддерживается на постоянном уровне. Согласно реакции (1), парциальное давление кислорода устанавливается на уровне

$$p_{\text{O}_2}^{1/2} = \frac{p_{\text{H}_2\text{O}}}{K_p \cdot p_{\text{H}_2}}, \quad (2)$$

где  $K_p$  – константа равновесия реакции (1);  $p_{\text{H}_2}$ ,  $p_{\text{O}_2}$ ,  $p_{\text{H}_2\text{O}}$  – парциальные давления компонентов реакции (1) в паровой камере, Па.

Поскольку парциальное давление кислорода в электроде сравнения при неизменной температуре постоянно, изменение парциального давления кислорода в паровой камере, в том числе на электролите со стороны платинового электрода, приводит к изменению ЭДС чувствительного элемента.

Кислород в рабочую камеру поступает от электрода сравнения (висмут, насыщенный кислородом от оксида висмута) через твердый электролит. Поддержание постоянной температуры электрода сравнения и твердого электролита стабилизирует парциальное давление кислорода в электроде сравнения и кислородно-ионную проводимость твердого электролита.

При условиях  $p_{\text{H}_2\text{O}} = \text{const}$  на измерительном электроде протекает только потенциалобразующая реакция (1).

Термодинамический анализ дает следующее выражение для определения ЭДС чувствительного элемента кислородного датчика с висмутовым электродом сравнения [4]:

$$E = 1,192 - 9,92 \cdot 10^{-5} \cdot T \cdot (2,742 + \lg a), \quad (3)$$

где  $a$  – термодинамическая активность кислорода со стороны платинового электрода;  $T$  – рабочая температура датчика, К;  $E$  – возникающая ЭДС, В.

Выражение (3) принято за исходное с целью получения выражения для практических расчетов величины ЭДС. Учитывая, что имеют место два фактора неопределенности, влияющие на ее оценку (парциальное давление водяного пара в паровой камере и фактор отклонения от идеальности электрохимического кислородного датчика), вводятся два эмпирических коэффициента  $k_1$  и  $k_2$ .

Термодинамическая активность кислорода со стороны платинового электрода прямо пропорциональна парциальному давлению кислорода в паровой камере. Поэтому, как следует из (2), активность кислорода в паровой камере имеет обратно пропорциональную зависимость от квадрата парциального давления водорода, в результате получим

$$E = 1,192 - 9,92 \cdot 10^{-5} \cdot T \cdot \left[ 2,742 + \lg \left( \frac{k_1}{p_{H_2}^2} \right) \right] \cdot k_2. \quad (4)$$

Концентрация водорода в натрии  $C_h$  связана с его давлением над натрием соотношением Сивертса:

$$C_h = k_s \cdot p_{H_2}^{0,5}, \quad (5)$$

где  $k_s = 4,34 \cdot 10^{-7}$  – константа Сивертса для водорода в натрии.

Для анализа полученной зависимости использовались известные данные измерений ЭДС при испытании трех экспериментальных образцов датчиков водорода на натриевом стенде АО «ГНЦ РФ – ФЭИ». Температура никелевой мембраны поддерживалась в ходе измерений равной 500°C. Со стороны парового объема на никелевую мембрану нанесено палладиевое покрытие. В таблицу 1 сведены полученные значения эмпирических коэффициентов уравнения (4).

Как следует из табл. 1, значения коэффициента  $k_1$  изменяются в широком диапазоне значений для различных образцов, имеющих одни и те же конструкцию и техноло-

Таблица 1

### Значения эмпирических коэффициентов в уравнении (4)

№ образца	$k_1$	$k_2$
1	$10^5$	1,01
2	$6 \cdot 10^7$	0,84
3	$4 \cdot 10^{15}$	0,55

гию изготовления. Это позволяет предположить, что значения давления паров воды в паровой камере однотипных датчиков формируются случайным образом и находятся в широких пределах (различие пять порядков). Таким образом, подтверждается неполнота стабилизации паров воды.

Исходя из (2), учитываем, что  $k_1$  прямо пропорционально квадрату давления паров воды:  $k_1 = A \cdot p_{\text{H}_2\text{O}}^2$  (где  $A$  – постоянная). Принимая в первом приближении равновесное давление паров воды 0,1 Па в паровой камере блока 1, получим следующие значения давления паров воды для двух других блоков: блок 2 – 2,45 Па; блок 3 – 20000 Па.

Данное рассмотрение показывает, что получение чисто теоретической зависимости ЭДС от концентрации водорода в натрии для этого типа датчиков без введения эмпирических коэффициентов не представляется возможным.

Имеет место сравнительно небольшое различие в значениях коэффициентов  $k_2$  для разных образцов датчиков, что вызвано индивидуальными особенностями установленных на них электрохимических кислородных элементов.

На рисунке 3 приведены кривые зависимости ЭДС от концентрации водорода в натрии для указанных в табл. 1 образцов. Зависимость давления водорода над натрием от его содержания в натрии приведена на рис. 4.

Окисление никелевой мембраны приводит к ухудшению характеристик электрохимического датчика. Чтобы никель не окислялся в атмосфере  $\text{H}_2\text{O} - \text{H}_2$ , должно выполняться условие, полученное из термодинамических оценок [3]:

$$\lg \frac{p_{\text{H}_2\text{O}}}{p_{\text{H}_2}} \leq 2 + \frac{325}{T}, \quad (6)$$

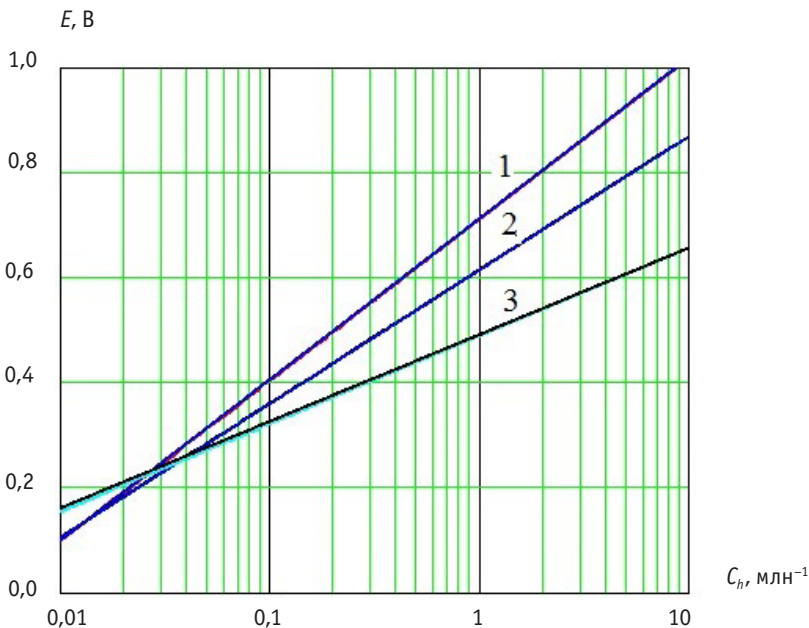


Рис. 3. Зависимость ЭДС различных образцов датчиков от концентрации водорода в натрии: 1, 2, 3 – номера блоков

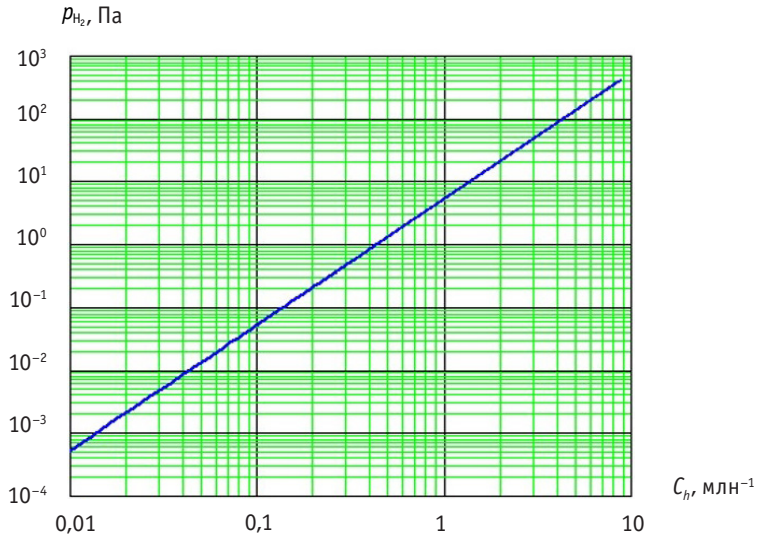


Рис. 4. Зависимость парциального давления водорода над натрием от его содержания в натрии

откуда следует, что в диапазоне рабочих температур датчика 623 – 773 К (350 – 500°С) давление паров воды не должно превышать давление водорода более чем в 260 – 330 раз. Поскольку равновесное давление водорода над натрием составляет ~0,01 Па ( $T_{заб} = 120 – 130^\circ$ ), то для исключения окисления мембраны датчика водорода в чистом натрии должно выполняться условие  $p_{H_2O} \leq 2$  Па. На практике для устранения этого недостатка можно использовать специальное защитное покрытие, например, палладий.

## Расчеты динамики изменения давления водорода в паровой камере электрохимического датчика водорода

Уменьшение объема паровой камеры позволяет снизить инерционность датчика в устройстве с никелевой мембраной. Для устройства с параметрами, представленными в табл. 2, рассчитано время достижения 67% от величины установившегося давления водорода в паровой камере (табл. 3). Кривая динамики изменения давления водорода в паровой камере объемом 2 мл показана на рис. 5. Проницаемость водорода в никеле оценивалась с использованием данных [5].

Таблица 2

### Значения исходных параметров датчика с никелевой мембраной

Исходные параметры	Численное значение
Площадь поверхности никелевой мембраны, см <sup>2</sup>	40
Толщина никелевой мембраны, мм	0,25
Температура чувствительного элемента датчика, °С	500
Объем паровой камеры, см <sup>3</sup>	0,2; 1,0; 1,5; 2; 6; 10
Концентрация водорода в натрии, млн <sup>-1</sup>	0,1

Таблица 3

### Варианты расчета динамики изменения давления водорода в паровой камере датчика с никелевой мембраной

Варианты расчета № п/п	Объем паровой камеры, мл	Время достижения 67% от величины установившегося давления водорода в паровой камере, с
1	10	435
2	6	330
3	2	125
4	1,5	95
5	1,0	63
6	0,2	13

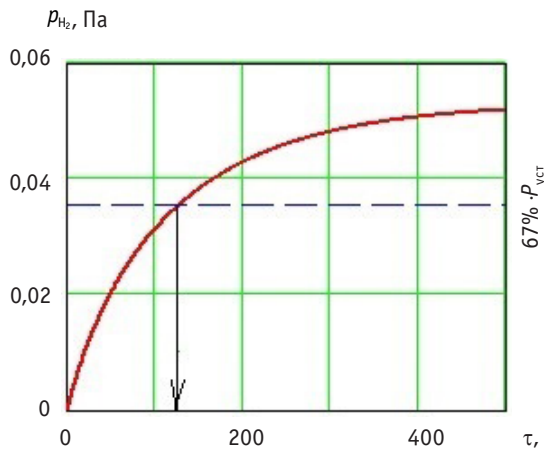


Рис. 5. Динамика изменения парциального давления водорода в паровой камере датчика с никелевой мембраной объемом 2 мл

Для сравнительного анализа динамики изменения парциального давления водорода в двух конструктивных вариантах (базовом с никелевой мембраной (7) и усовершенствованном с разделительной палладиевой мембраной (7), (8)) были получены конечно-разностные уравнения следующего вида:

$$p_{i,j+1}^{K_1} = p_{i,j}^{K_1} + K_n^{Ni} \frac{(C_H^{Na} - k_s \cdot \sqrt{p_{i,j}^{K_1}}) \cdot R \cdot T_i \cdot S_{Ni}}{V_{K_1} \cdot \mu \cdot \delta_{Ni}} \cdot \Delta\tau, \quad (7)$$

где  $p_{i,j}^{K_1}$ ,  $p_{i,j+1}^{K_1}$  – парциальное давление водорода в камере  $K_1$  на шагах  $j$  и  $j+1$ , Па;  $K_n^{Ni}$  – коэффициент проницаемости никеля, кг/(м·с);  $C_H^{Na}$  – концентрация водорода в натрии, млн<sup>-1</sup>;  $R$  – газовая постоянная, Дж/(моль·К);  $T_i$  – рабочая температура, К;  $S_{Ni}$  – площадь никелевой мембраны, м<sup>2</sup>;  $V_{K_1}$  – объем камеры  $K_1$ , м<sup>3</sup>;  $\mu$  – молярная масса водорода, кг/моль;  $\delta_{Ni}$  – толщина никелевой мембраны, м;  $\Delta\tau$  – шаг по времени, с,

$$p_{i,j+1}^{K_2} = p_{i,j}^{K_2} + K_n^{Pd} \cdot k_s \cdot \frac{(\sqrt{p_{i,j}^{K_1}} - \sqrt{p_{i,j}^{K_2}}) \cdot R \cdot T_i \cdot S_{Pd}}{V_{K_2} \cdot \mu \cdot \delta_{Pd}} \Delta \tau, \quad (8)$$

где  $p_{i,j}^{K_2}$ ,  $p_{i,j+1}^{K_2}$  – парциальное давление водорода в камере  $K_2$  на шагах  $j$  и  $j+1$ , Па;  $K_n^{Pd}$  – коэффициент проницаемости палладия, кг/(м·с);  $S_{Pd}$  – площадь палладиевой мембраны, м<sup>2</sup>;  $V_{K_2}$  – объем камеры  $K_2$ , м<sup>3</sup>;  $\delta_{Pd}$  – толщина палладиевой мембраны, м.

Рассмотрена конструкция усовершенствованного чувствительного элемента электрохимического датчика, представленная на рис. 6. В этом датчике паровая камера отделена от камеры с никелевой мембраной палладиевой мембраной.

Для данной конструкции выполнены расчеты динамики изменения давления водорода в паровой камере для различного соотношения объемов камеры с никелевой мембраной и паровой камерой и определено время достижения 67% от максимального значения давления водорода. Проницаемость водорода в палладии оценивалась по данным [6].

Исходные параметры, принятые в расчете, сведены в табл. 4. Варианты значений объемов паровой камеры и камеры с никелевой мембраной и результаты расчетов времени достижения 67% от величины установившегося давления водорода в паровой камере приведены в табл. 5.

Результаты расчета динамики изменения давления водорода в паровой камере  $K_2$  и камере  $K_1$  для варианта  $V_1 = 1$  мл и  $V_2 = 1$  мл приведены на рис. 7.

Для указанных исходных параметров давления водорода в камере с никелевой мембраной и паровой камере имеют практически одинаковые значения в течение всего времени напуска водорода. Для рассматриваемых условий мембрана из палладия не оказывает влияния на динамику поступления водорода в паровую камеру ввиду высокой проницаемости водорода.

В рассмотренных вариантах с различными объемами камер чувствительного элемента датчика время достижения 67% от величины установившегося давления водорода в паровой камере находится

в пределах от 13 до 600 секунд. Наименьшее значение в рассматриваемом диапазоне соответствует величине объемов каждой из обеих камер 0,1 см<sup>3</sup>. Использование палладиевой мембраны для отделения паровой камеры от камеры с никелевой мембраной не приводит к снижению его инерционности при отношении площадей мембран  $S_1/S_2 < 20$  и объемах камер  $K_1$  и  $K_2$  менее 1 мл. Вместе с тем, установка палладиевой мембраны исключает попадание паров воды в камеру с никелевой мембраной, предотвращая ее окисление.

Рост давления водорода в паровой камере отстает от его роста в камере с никелевой мембраной. Кривые роста давления при отношении площадей мембран  $S_1/S_2 = 200$

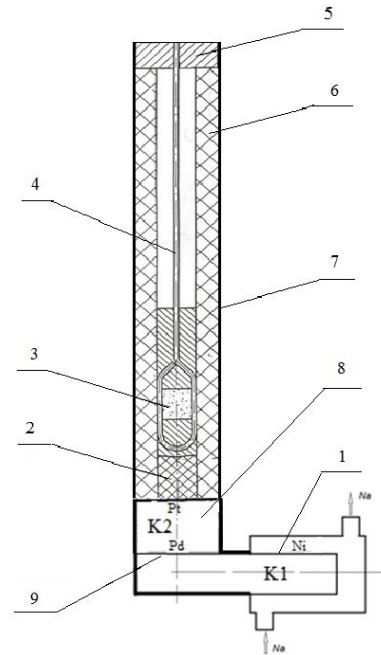


Рис. 6. Принципиальная схема усовершенствованного электрохимического датчика водорода: 1 – никелевая мембрана; 2 – твердый электролит; 3 – электрод сравнения; 4 – потенциальный вывод; 5 – изолятор; 6 – пробирка; 7 – корпус; 8 – паровая камера; 9 – палладиевая мембрана; K1 – камера с никелевой мембраной; K2 – паровая камера

Таблица 4

### Значения исходных параметров для усовершенствованного датчика водорода

Исходные параметры	Численное значение
Площадь поверхности никелевой мембраны $S_1$ , см <sup>2</sup>	40
Площадь поверхности палладиевой мембраны $S_2$ , см <sup>2</sup>	2
Толщина никелевой мембраны $\delta_1$ , мм	0,25
Толщина палладиевой мембраны $\delta_2$ , мм	0,2
Температура чувствительного элемента датчика, °С	500
Объем камеры с никелевой мембраной $V_1$ , см <sup>3</sup>	0,1; 0,5; 1; 5
Объем паровой камеры $V_2$ , см <sup>3</sup>	0,1; 0,5; 1; 5
Концентрация водорода в натрии, млн <sup>-1</sup>	0,1

Таблица 5

### Варианты расчета динамики изменения давления водорода в паровой камере усовершенствованного датчика водорода

Варианты расчета № п/п	Объем камеры с никелевой мембраной $V_1$ , мл	Объем паровой камеры $V_2$ , мл	Время достижения 67% от величины установившегося давления водорода в паровой камере, с
1	5	5	600
2	5	1	350
3	1	5	350
4	1	1	125
5	1	0,5	95
6	0,5	1	95
7	0,5	0,5	63
8	0,1	0,1	13

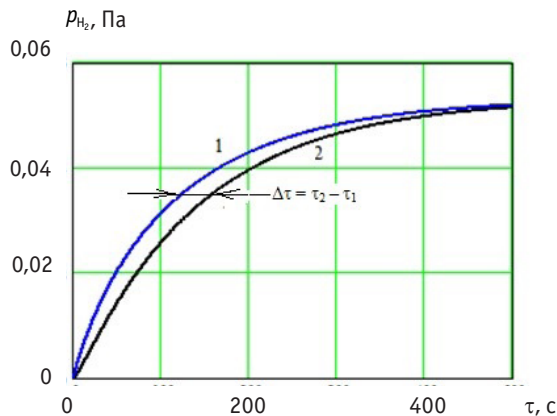


Рис. 7. Динамика изменения парциального давления водорода в паровой камере (кривая 2) и камере с никелевой мембраной (кривая 1) при отношении площадей мембран  $S_1/S_2 = 200$ ,  $V_1 = 1$  мл,  $V_2 = 1$  мл

представлены на рис. 8. Время запаздывания между этими кривыми зависит от соотношения площадей никелевой и палладиевой мембран, а также объемов камер  $K_1$  и  $K_2$ . На рисунке 8 приведена зависимость времени замедления роста давления водорода в паровой камере по сравнению с ростом давления в камере с никелевой мембраной ( $\Delta\tau = \tau_2 - \tau_1$ ) от величины отношения площадей никелевой и палладиевой мембран  $S_1/S_2$ . Оценки выполнены с учетом указанных выше значений исходных параметров.

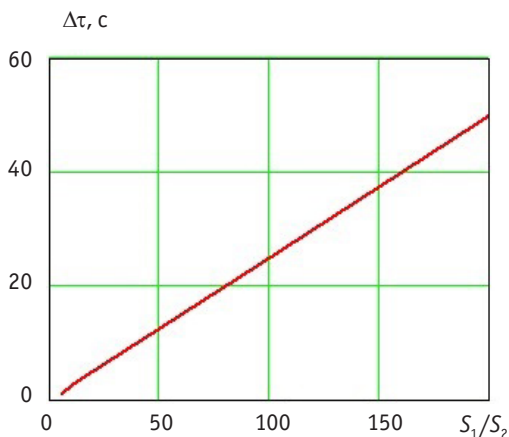


Рис. 8. Зависимость времени замедления роста давления водорода в паровой камере по сравнению с ростом давления в камере с никелевой мембраной ( $\Delta\tau = \tau_2 - \tau_1$ ) от величины отношения площадей никелевой и палладиевой мембран  $S_1/S_2$

## Заключение

Получена полуэмпирическая зависимость для расчета ЭДС чувствительного элемента электрохимического датчика водорода, содержащая два эмпирических коэффициента  $k_1$  и  $k_2$ , учитывающих неопределенность величины давления водяного пара в паровой камере и фактор отклонения от идеальности электрохимического кислородного датчика.

С использованием известных экспериментальных данных рассчитаны значения эмпирических коэффициентов для расчета ЭДС трех экспериментальных образцов датчиков водорода. По результатам расчетов можно предположить, что значения давления паров воды в паровой камере рассматриваемых датчиков формируется случайным образом и находятся в широких пределах.

Для указанных выше исходных параметров усовершенствованного датчика давление водорода в камере с никелевой мембраной и паровой камере имеет практически одинаковое значение. При этом мембрана из палладия не оказывает существенного влияния на динамику поступления водорода в паровую камеру ввиду ее высокой проницаемости.

В приведенных вариантах с указанным объемом паровой камеры чувствительного элемента время достижения 67% от величины установившегося давления водорода в паровой камере находится в пределах от 13 до 600 секунд. Наименьшее значение соответствует величине объема каждой из двух камер  $0,1 \text{ см}^3$ . Использование палла-

диевой мембраны для разделения паровой камеры и камеры с никелевой мембраной не приводит к снижению инерционности датчика при отношении площадей мембран  $S_1/S_2 < 20$  и объемах камер  $K_1$  и  $K_2$  менее 1 мл. Вместе с тем, установка палладиевой мембраны исключает попадание паров воды в камеру с никелевой мембраной, предотвращая ее окисление.

Датчики водорода позволяют осуществлять непрерывный мониторинг состояния контура с натриевым теплоносителем. Они дают возможность локализовать аварию на ранней стадии. Разработка и исследование новых устройств контроля стратегически важны для развития натриевой технологии, так как это может обеспечить безопасную, надежную и экономически эффективную эксплуатацию РУ с реактором БН.

### Литература

1. Борисов В.В., Камаев А.А. и др. Принципы построения и развитие системы автоматической защиты парогенераторов быстрых натриевых реакторов. *Известия вузов. Ядерная энергетика*. 2023;3:5–18. DOI: <https://doi.org/10.26583/ipe.2023.3.01>
2. Каталог измерительных приборов ГРСИ РФ. Анализаторы электрохимические содержания водорода в натрии и инертном газе ЭХДВ (Н, Г). URL: <https://all-pribors.ru/opisanie/60406-15-ekhdv-ng-71403> (дата обращения 09.05.2025).
3. Блохин В.А., Борисов В.В. и др. Датчики для внутриреакторного контроля водорода и кислорода в натрии. *Вопросы атомной науки и техники. Серия: Ядерно-реакторные константы*. 2017;4:5–14. URL: <https://vant.ippe.ru/images/pdf/2017/4-1.pdf> (дата обращения 10.02.2026).
4. Мусихин Ю.А. Влияние электродной поляризации на показания электрохимического датчика кислорода в жидкометаллических теплоносителях ядерных энергетических установок. Москва, ИздАТ, 2018, 175 с. ISBN 978-5-86656-287-9.
5. Алексеев В.В., Сорокин А.П., Кузина Ю.А. Исследования массопереноса трития в контурах с натриевым теплоносителем. *Вопросы атомной науки и техники. Серия: Ядерно-реакторные константы*. 2024;4:107–122. URL: <https://vant.ippe.ru/images/pdf/2024/issue2024-1-107-122.pdf> (дата обращения 10.02.2026).
6. Пипко А.И., Плисковский В.Я., Пенчко Е.А. Конструирование и расчет вакуумных систем. Москва, Энергия, 1970, 504 с.

Поступила в редакцию 11.11.2025

После доработки 12.02.2026

Принята к опубликованию 12.05.2026

### Авторы

Алексеев Виктор Васильевич – главный научный сотрудник, д.т.н,

E-mail: [alexeev@ippe.ru](mailto:alexeev@ippe.ru)

Борисов Вячеслав Владимирович – главный специалист,

E-mail: [vvborisov@ippe.ru](mailto:vvborisov@ippe.ru)

Камаев Алексей Альфредович – начальник департамента, к.т.н.,

E-mail: [kamaev@ippe.ru](mailto:kamaev@ippe.ru)

Ганичев Николай Сергеевич – начальник лаборатории,

E-mail: [nganichev@ippe.ru](mailto:nganichev@ippe.ru)

Саванков Вячеслав Геннадьевич – инженер-исследователь,

Email: [vgsavankov@ippe.ru](mailto:vgsavankov@ippe.ru)

UDC 621.039.534.63

**Research Justifying an Enhanced Electrochemical Hydrogen Detector in Sodium****Alekseev V.V., Borisov V.V., Kamaev A.A., Ganichev N.S., Savankov V.G.**

IPPE JSC,

1 Bondarenko Sq., 249033, Kaluga reg., Obninsk, Russia

**Abstract**

Monitoring of the hydrogen content in sodium is one of the important safety tasks during operation of a reactor facility with a fast neutron reactor with a sodium coolant. Timely indication of a small leak makes it possible to localization of the accident before the destruction of the steam generator tubes. A key element of the hydrogen monitoring system is a sensor that continuously measures the concentration of hydrogen in sodium. This paper examines the design and operational principle of an electrochemical hydrogen sensor in sodium. A semi-empirical expression for calculating the electromotive force (EMF) has been proposed. This formula incorporates two key coefficients:  $k_1$ , associated with the water vapor pressure in the steam chamber, and  $k_2$ , which characterizes the deviation from ideality in the oxygen sensor. Experimental data revealed a significant scatter in the values of the  $k_1$  coefficient, confirming the imperfection of water vapor stabilization. The minor variations observed in the  $k_2$  coefficients across different sensor units are attributed to the individual characteristics of the installed electrochemical oxygen cells. An enhanced sensor design featuring a palladium membrane is considered. This membrane serves to separate the steam chamber from the chamber equipped with a nickel membrane. Calculations were performed to model the dynamics of hydrogen pressure changes within the steam chamber for both the standard nickel-membrane sensor and its advanced modification. The time required to reach 67% of the equilibrium hydrogen pressure was determined for various chamber volume ratios. The analysis demonstrates that for chamber volumes of less than 1 ml and a membrane area ratio of  $S_1/S_2 < 20$ , the incorporation of the palladium membrane does not lead to a reduction in sensor inertia. However, its critical function is to prevent oxidation of the nickel membrane by effectively blocking the permeation of water vapor. The obtained results can be utilized to optimize the design of Electrochemical Hydrogen Detectors in Sodium (EKHDV-N) in automatic steam generator protection systems (SAZ PG) as part of the reactor facility with a fast sodium reactor in order to reduce inertia and increase the service life of the sensors.

**Keywords:** sodium hydrogen sensor, sodium oxygen sensor, transducer element, solid electrolyte, reference electrode, nickel membrane, hydrogen partial pressure, electrochemical sensor, EMF, vapor-water chamber, fast sodium reactor, steam generator, palladium coating, automatic steam generator protection system, thermodynamic activity, empirical coefficients.

**For citation:** Alekseev V.V., Borisov V.V., Kamaev A.A., Ganichev N.S., Savankov V.G. Research Justifying an Enhanced Electrochemical Hydrogen Detector in Sodium. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*. 2026;2:70–82. DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2026.2.05> (in Russian).

**References**

1. Borisov V.V., Kamaev A.A., Myazdrikova O.I., Mikhin S.A., Pakhomov I.A., Perevoznikov S.V. Principles of construction and development of the automatic protection system for steam generators of fast sodium reactors. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*. 2023;3:5–18. DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2023.3.01> (in Russian).

2. State Register of Measuring Instruments of the Russian Federation. Electrochemical analyzers of hydrogen content in sodium and inert gas EKhdV (H, G). URL: <https://all-pribors.ru/opisanie/60406-15-ekhdv-ng-71403> (accessed May 09, 2025) (in Russian).
3. Blokhin V.A., Borisov V.V., Kamaev A.A., Kukharchuk O.F., Meshakin V.I., Pakhomov I.A., Poplavskii V.M., Suvorov A.A., Trufanov A.A. Sensors for in-reactor monitoring of hydrogen and oxygen in sodium. *Problems of atomic science and technology. Series: Nuclear and reactor constants*. 2017;4:5–14. URL: <https://vant.ippe.ru/images/pdf/2017/4-1.pdf> (accessed Feb. 10, 2026) (in Russian).
4. Musikhin Yu.A. *Influence of electrode polarization on the readings of an electrochemical oxygen sensor in liquid metal coolants of nuclear power plants*. Moscow, IzdAT Publ., 2018, 175 p. ISBN 978-5-86656-287-9 (in Russian).
5. Alekseev V.V., Sorokin A.P., Kuzina Yu.A. Studies of tritium mass transfer in circuits with sodium coolant. *Problems of atomic science and technology. Series: Nuclear and reactor constants*. 2024;4:107–122. URL: <https://vant.ippe.ru/images/pdf/2024/issue2024-1-107-122.pdf> (accessed Feb. 10, 2026) (in Russian).
6. Pipko A.I., Pliskovskii V.Ya., Penchko E.A. *Design and calculation of vacuum systems*. Moscow, Energiya Publ., 1970, 504 p. (in Russian).

## Authors

Victor V. Alekseev, Chief Researcher, Dr. Sci. (Engineering),

E-mail: [alexeev@ippe.ru](mailto:alexeev@ippe.ru)

Vyacheslav V. Borisov, Chief Specialist,

E-mail: [vvborisov@ippe.ru](mailto:vvborisov@ippe.ru)

Alexey A. Kamaev, Head of Department, Cand. Sci. (Engineering),

E-mail: [kamaev@ippe.ru](mailto:kamaev@ippe.ru)

Nikolay S. Ganichev, Head of Laboratory,

E-mail: [nganichev@ippe.ru](mailto:nganichev@ippe.ru)

Vyacheslav G. Savankov, Research Engineer,

Email: [vgsavankov@ippe.ru](mailto:vgsavankov@ippe.ru)