

*П. Г. Михайлов, Л. А. Маринина, Т. А. Глебова,
А. Базарбай, А. В. Соколов, А. У. Аналиева*

ЧУВСТВИТЕЛЬНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ ВОДОРОДА. МЕТОДЫ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ И БАЗОВЫЕ КОНСТРУКЦИИ

*P. G. Mikhaylov, L. A. Marinina, T. A. Glebova,
L. Bazarbay, A. V. Sokolov, A. U. Analieva*

SENSITIVE ELEMENTS OF HYDROGEN. CONVERSION METHODS AND BASIC CONSTRUCTS

А н н о т а ц и я. Актуальность и цели. Использование водорода в качестве экологически чистого и неисчерпаемого эффективного источника энергии в различных транспортных системах, в науке и технике является весьма актуальной задачей для всего человечества. В то же время для широкого использования водорода на практике крайне необходимо решить такие насущные проблемы, как его хранение, контроль утечек и предотвращение его самопроизвольного возгорания и взрыва. **Материалы и методы.** Выбраны методы преобразования и предложены конструкции пленочных и полупроводниковых элементов чувствительных к водороду (ЭЧВ), которые были использованы для контроля утечек водорода при его заправке в баки ракетно-космической системы «Бурани-Энергия». **Результаты.** Были разработаны и апробированы конструкции ЭЧВ на основе пленок палладий-серебро и полевых транзисторов, которые отличаются малыми габаритами и сниженным энергопотреблением. **Выводы.** Разработанные в результате проведения НИР конструктивные решения ЭЧВ и проверка их на испытательном стенде показали достаточную сходимость теоретических расчетов и результатов испытаний, что доказало целесообразность дальнейшего развития данного направления по созданию ЭЧВ.

A b s t r a c t. Background. The use of hydrogen as an environmentally friendly and inexhaustible efficient source of energy in various transport systems, in science and technology, is a very urgent task for all mankind. At the same time, for widespread use of hydrogen in practice, it is extremely necessary to solve such pressing problems as its storage, leak control and prevention of spontaneous combustion and explosion. **Materials and methods.** Conversion methods are Selected and designs of film and semiconductor elements of sensitive hydrogen (ESH) are proposed, which were used to control hydrogen leaks when it was refueled in the tanks of the Buran-Energiya rocket and space system. **Results.** We developed and tested ESH designs based on palladium-silver films and field-effect transistors, which are characterized by small dimensions and reduced energy consumption. **Conclusions.** The design solutions of ESH Developed as a result of research and testing on the test bench showed sufficient convergence of theoretical calculations and test results, which proved the feasibility of further development of this direction for creating ESH.

К л ю ч е в ы е с л о в а: водород, газ, чувствительный элемент, полевой транзистор, затвор, сенсор.

K e y w o r d s: hydrogen, gas, sensor element, field-effect transistor, gate, sensor.

Введение

Водородные технологии являются очень востребованными в промышленности, транспорте, экологии. Это связано с тем, что такие технологии не наносят вреда окружающей среде, на земле существуют неисчерпаемые запасы водорода, которые могут быть получены, например, путем электролиза обычной воды. Энергоемкость водорода на порядок выше, чем у традиционных углеводородов. Так, для космических аппаратов в настоящее время используются никель-водородные аккумуляторы, которые по техническим характеристикам превосходят остальные аккумуляторы. Но на пути применения водорода в технике и быту есть определенные трудности и ограничения, связанные с взрывоопасностью и утечками водорода, а также со сложностью его хранения. Для контроля утечек водорода требуются специализированные селективные сенсоры, которые позволяют измерять низкие концентрации газообразного водорода [1, 2].

Конструкции чувствительных элементов газовых сенсоров

В литературе и на рынке газовых сенсоров (ГС) достаточно широко представлены отдельные сенсоры и измерительные системы, предназначенные для анализа газов и газовых смесей, в том числе и водородосодержащих [3–5]. Обобщенная классификация методов преобразования для ГС, представлена на рис. 1.

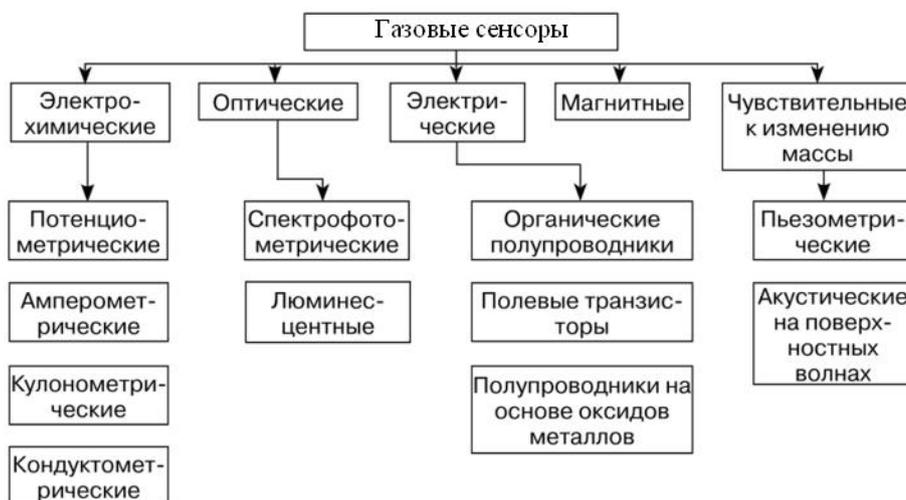


Рис. 1. Классификация газовых сенсоров по принципам преобразования

Основным элементом в ГС является газочувствительный элемент (ГЧЭ), преобразующий информативный электрофизический параметр анализируемого газа в иной, чаще всего в электрический параметр (ток, напряжение, частоту, емкость, проводимость). При этом преобразование концентрации контролируемого газа в многокомпонентной газовой смеси представляет собой довольно сложную и неоднозначную задачу, так как предполагает многоступенчатое преобразование разнородных физико-химических величин, например, концентрации носителей заряда, теплоемкости, сдвига уровня плоских зон, изменения туннельного тока, сдвига фазы когерентного излучения и проч. [6–9].

Следует отметить, что основными (базовыми), используемыми на практике ГЧЭ являются: термокондуктометрические, термохимические, а также микроэлектронные – пленочный и полупроводниковый. Проанализируем их более подробно с целью использования разработанных в них конструктивных решений [10, 11].

Термокондуктометрический ЧЭ (рис. 2, а, б) содержит измерительный элемент (ИЭ) в виде спирали из платиновой или никелевой проволоки, питаемой постоянным током, или два элемента R_1 и R_2 , последний – опорный – служит для компенсации погрешности от температуры. По своей сути измерительные элементы являются терморезисторами с линейным изменением своего сопротивления от температуры.

Термохимический ЧЭ (рис. 2, в) обеспечивает измерение содержания горючих газов, особенно СО в окружающем воздухе или в автомобильных выхлопных газах. Принцип действия ячейки состоит в том, что СО реагирует с кислородом воздуха на активном катализаторе, образуя CO_2 . Выделяющееся при этом тепло, разогревая активную спираль, вызывает повышение ее сопротивления.

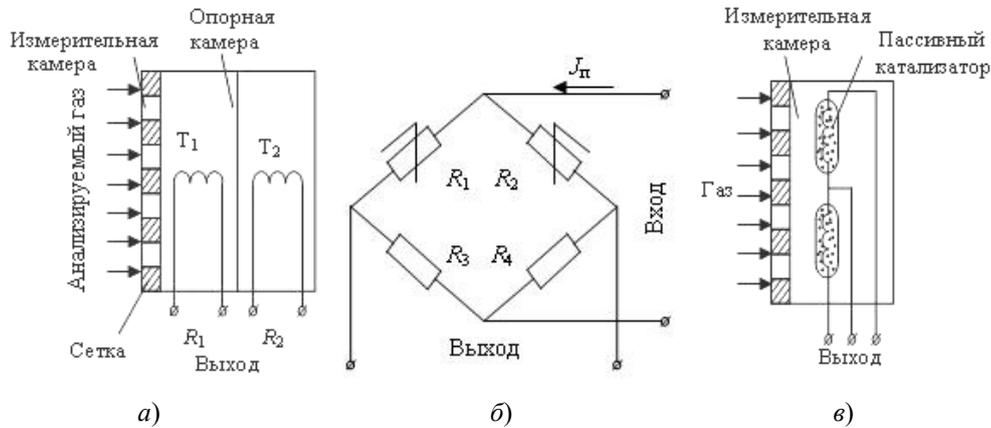


Рис. 2. Газовые чувствительные элементы:

а – структура; б – электрическая схема термокондуктометрического ЧЭ; в – термохимического ЧЭ

Резистор, покрытый пассивным катализатором, изменяет свое сопротивление только в зависимости от температуры окружающей среды, компенсируя влияние последней. С помощью ГС, оснащенных термохимическими ЧЭ, можно измерять весьма малые концентрации горючих газов (по СО до 10^{-4} %). Соответствующим подбором катализатора и температуры проволоки можно достигнуть определенной избирательности по анализируемым газам.

Полупроводниковые ЧЭ представлены на рис. 3. Все большее распространение получают твердотельные кремневые (полупроводниковые) газовые датчики. Они состоят из кремниевого кристалла, в теле которого методами термодиффузии, ионного легирования, вакуумного осаждения сформированы газочувствительная пленка из SnO_2 , диффузионный резистор-нагреватель и термочувствительный диод. Сопротивление газочувствительной пленки уменьшается обратно пропорционально концентрации анализируемого газа. Для повышения точности температура ЧЭ стабилизируется на уровне 80°C .

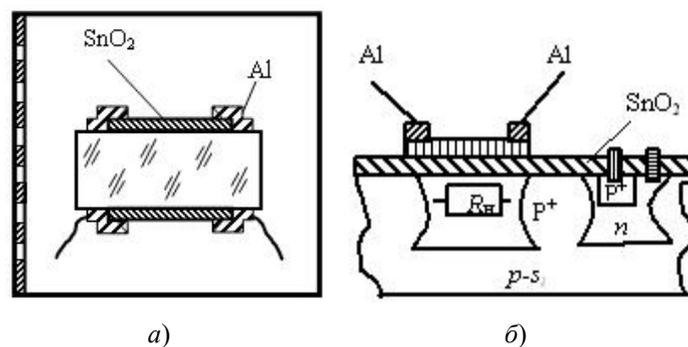


Рис. 3. Микроэлектронные ГЧЭ:

а – тонкопленочный; б – твердотельный

Для линеаризации и термокомпенсации характеристик ЭЧВ и сенсоров в целом используются как аппаратные способы (включение дополнительных резисторов и терморезисторов), так и программные (полиномиальная аппроксимация, введение поправок) методы моделирования [12, 13].

В качестве примера зависимости ЭФХ микроэлектронных ГЧЭ от концентрации газов на рис. 4 приведены концентрационная зависимость и циклограмма работы ГЧЭ.

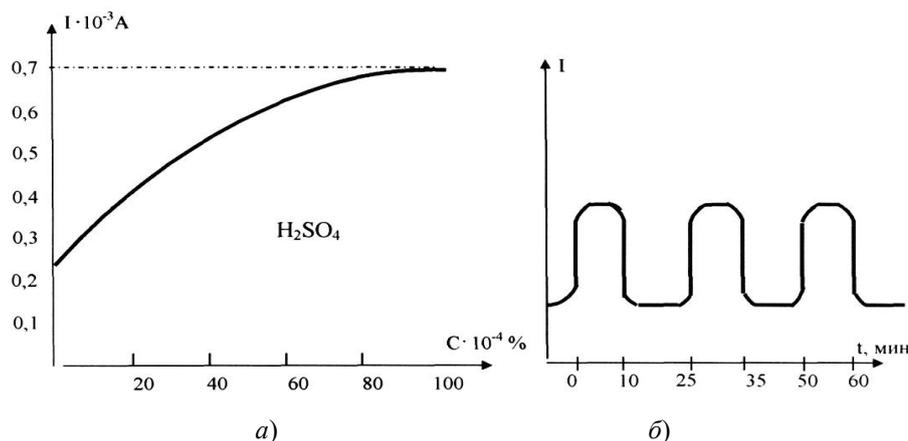


Рис. 4. Пример зависимости ЭФХ микроэлектронных ГЧЭ от концентрации газов:
 а – концентрационная зависимость ГЧЭ по отношению к парам серной кислоты;
 б – циклограмма работы ГЧЭ

Среди электрохимических сенсоров (ЭХС) получили распространение миниатюрные устройства, основанные на полевых транзисторах (рис. 5) [7, 14]. В них металлический контакт затвора транзистора заменен химически чувствительным слоем и электродом сравнения. В этом случае затвор представляет собой металлический слой, покрытый чувствительным материалом. Взаимодействие определяемого компонента с материалом затвора вызывает изменение электрического поля в области затвора и, следовательно, порогового потенциала и тока в транзисторе, что и обуславливает аналитический сигнал. Эти устройства чувствительны к некоторым газам, например H_2 , NH_3 , CH_4 , H_2S , с пределом обнаружения до 10^{-4} и 10^{-5} %. Чувствительность и селективность прибора обеспечиваются варьированием толщины активной зоны и типа катализаторов, а также подбором операционных температур, при которых функционируют элементы системы.

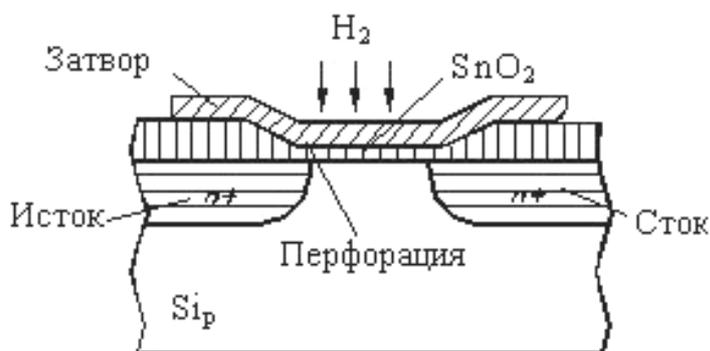


Рис. 5. Водородочувствительный элемент на основе полевого транзистора

Один из недостатков полевых транзисторов напрямую связан с принципом их функционирования, в соответствии с которым продукт каталитической реакции (например, водород) должен пройти через каталитически активный слой, чтобы воздействовать на зарядочувствительную структуру. Для этого в компоновке сенсора предусматривается наличие своеобразного «окна» проницаемости между каталитически активным слоем и затвором транзистора. Технологически эти требования удовлетворить достаточно сложно, в связи с чем использование ГС на основе ПТ на настоящий момент ограничивается в основном лабораторными исследованиями. Главными преимуществами ГС на ПТ являются: малые габариты (поверхность $1...2 \text{ мм}^2$) и масса; сравнительно высокое быстродействие ($1...10$ с); возможность одновременного определения нескольких компонентов анализируемой смеси. Полупроводниковые ГС применяют, в частности, для определения ионов K^+ , O_2 , оксидов азота, H_2S , CO , H_2 , углеводородов с пределами обнаружения $10^{-4}...10^{-5}$ объемных %. Недостатками таких ГС являются высокая (помеховая) чувствительность к парам воды, а также склонность к отравлению (необратимой по-

тере чувствительности) за счет поглощения летучих соединений серы и некоторых других органических соединений. Поскольку в их конструкции отсутствуют движущиеся детали и узлы, ГС являются потенциально надежными и долговечными.

Довольно успешно развивается отдельное направление ГС, основанное на применении в качестве ГЧЭ оптоволоконна с газопоглощающими покрытиями (рис. 6) [8, 9, 15].

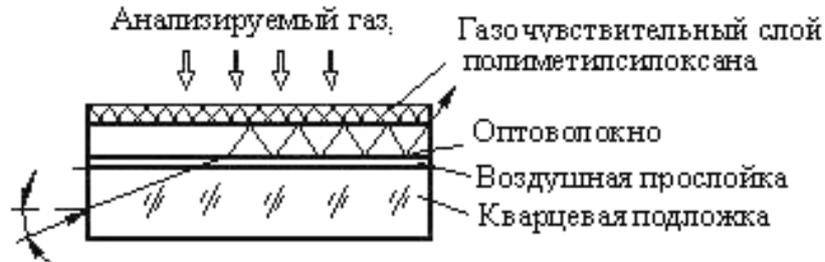


Рис. 6. Оптоволоконный ГЧЭ с активным газочувствительным слоем

Волоконно-оптические световоды на основе кварца, германатных, фторидных, халькогенидных стекол, кристаллов галогенидов таллия, серебра или цезия и полимерных материалов позволяют работать в инфракрасном (ИК), видимом и ультрафиолетовом (УФ)-диапазонах спектра. Созданы оптические сенсоры для определения pH растворов, ионов K^+ и Na^+ , CO_2 , O_2 , глюкозы и других веществ. В оптоволоконных сенсорах (ОВС) на торце световода может располагаться газопоглощающее или иное вещество, изменяющее свои оптические характеристики под действием контролируемого газа. К таким характеристикам относятся амплитуда, фаза, спектр оптического излучения.

Для повышения временной стабильности и снижения деградационных явлений в ГС на основе ПТ была разработана и апробирована улучшенная конструкция ЭЧВ (рис. 7). Особенностью такой конструкции является использование структуры металл-диэлектрик-полупроводник (МДП), выполненной в виде транзистора с подвешенным затвором [16].

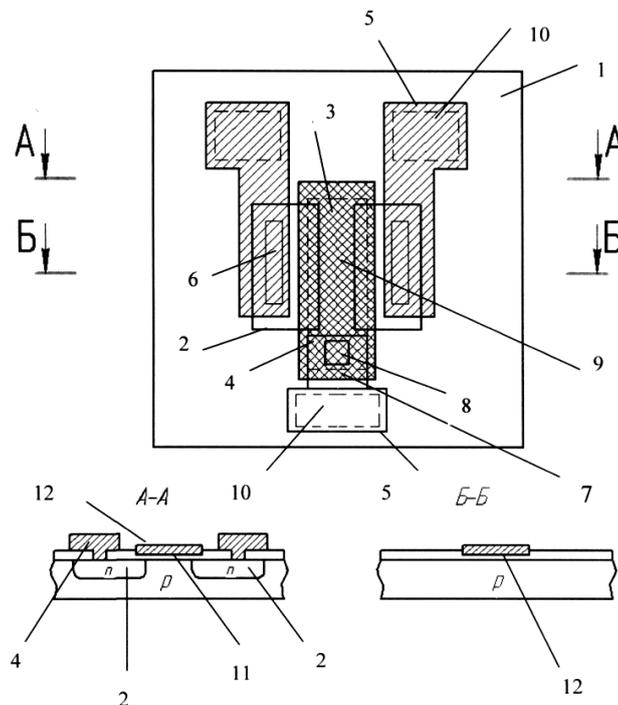


Рис. 7. ЭЧВ на основе МДП-транзистора с подвешенным затвором:

- 1 — Si — кристалл; 2 — области истока и стока; 3 — область с подзатворным диэлектриком;
- 4 — Al металлизация; 5 — контактные площадки; 6 — окна в окисле под контакт Al к Pd;
- 7 — участок Al металлизации, перекрытый Pd; 8, 9 — окна в защитной пленке SiO_2 ;
- 10 — Pd затвор; 11 — подзатворный окисел; 12 — затвор

Пленка палладия (Pd) интенсивно поглощает газообразный водород, образуя тем самым область с положительным встроенным зарядом, который управляет током исток-сток, формируя чувствительность к водороду. После цикла измерения остаточный водород из Pd затвора удаляется путем нагревания. Благодаря наличию воздушного промежутка между затвором и областями истока-стока МДП-транзистора остаточный заряд не проникает в активную зону, тем самым отсутствует эффект «отравления» и не уменьшается его чувствительность.

Указанный ЭЧВ в виде чипа устанавливается в измерительный модуль (ИМ) и его контактные площадки соединяются через проволочные выводы с соответствующими гермовыводами ИМ датчика водорода (рис. 8).

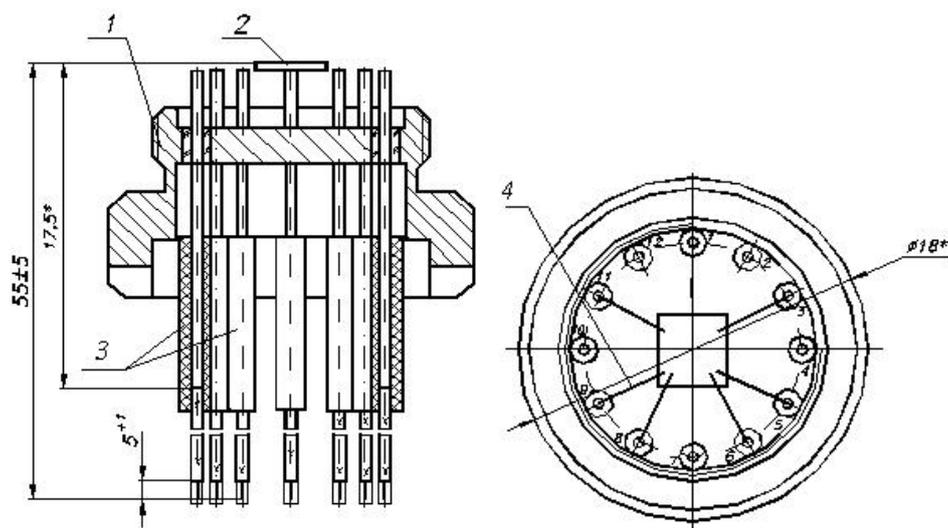


Рис. 8. Конструкция измерительного модуля датчика водорода со смонтированным в нем ЭЧВ:
1 – корпус ИМ; 2 – ЭЧВ; 3 – гермовыводы; 4 – проволочные выводы

Как показали исследования, электрофизические характеристики (ЭФХ) ЭЧВ на основе МДП-транзистора с подвешенным затвором имеют тенденцию к деградации, поэтому был разработан элемент, содержащий тонкопленочный газочувствительный резистор из сплава палладия с серебром (рис. 9) [17, 18]. Кроме того, в ЭЧВ для повышения чувствительности и уменьшения инерционности уменьшили толщину перемычки. Датчик на основе такого ЭЧВ был использован для контроля утечек водорода при заправке топливных баков ракеты-носителя «Энергия» с кислородно-водородным двигателем [19].

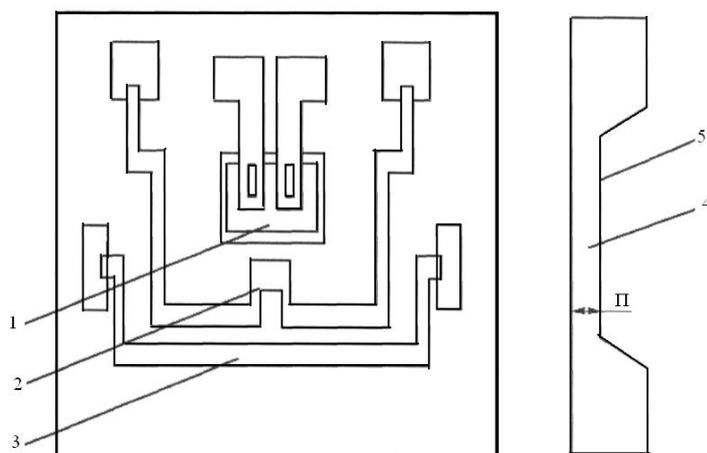


Рис. 9. Модернизированный ЭЧВ сенсора водорода:
1 – диодный термочувствительный элемент; 2 – тонкопленочный газочувствительный резистор из сплава палладия с серебром; 3 – диффузионный нагревательный элемент;
4 – тонкая перемычка; 5 – профиль

Характеристики изготовленных экспериментальных образцов ЭЧВ были исследованы на испытательном стенде (рис. 10) путем подачи контрольной газовой смеси, содержащей водород с 6 % объемной концентрацией и инертный газ – азот. По трубопроводам с клапанами в камеру подавались либо смесь водорода с азотом различной концентрации (0,3, 0,75, 1, 2 % соответственно), либо чистый азот или гелий для регенерации и обезгаживания ЧЭВ. Изменения напряжения на выходе схемы измерения при испытаниях регистрировались с помощью самописца.

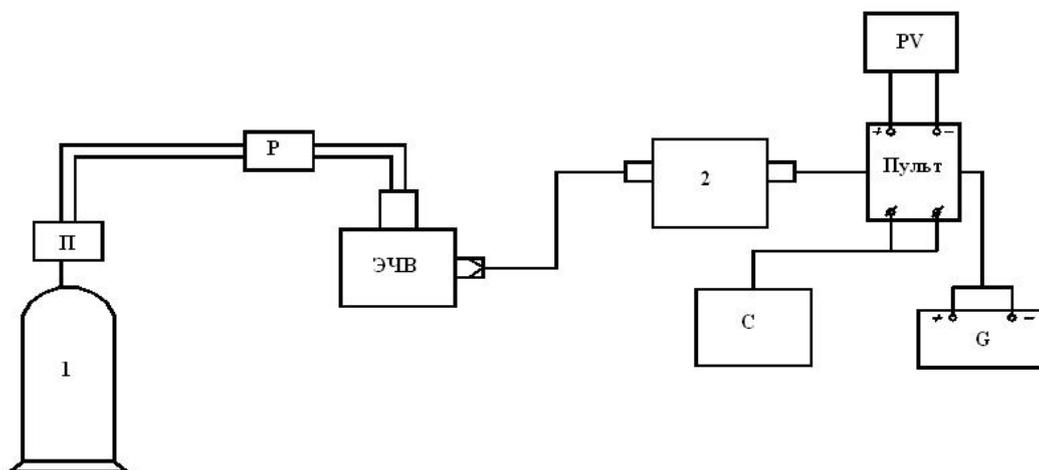


Рис. 10. Испытательный стенд для исследования водородных чувствительных элементов: ЭЧВ – элемент чувствительный к водороду; 1 – баллон с контрольной газовой смесью (6 % H_2 +94 % N_2); 2 – электронный преобразователь; П – редуктор газовый БКО-25; Р – ротаметр РМ-ГС-0,25; PV – вольтметр В7-46; G – источник питания постоянного тока Б5-49; С – регистратор типа КСП-2

Заключение

По результатам испытаний экспериментальных образцов были сделаны следующие выводы, связанные с влиянием газов и температуры на показания ЧЭВ:

1. При барометрическом давлении 750 мм рт.ст. и температуре окружающей среды 14 °С наблюдается эффект увеличения показаний ЧЭВ при подаче воздуха с влажностью 100 %. При этом величина эффекта меньше погрешности измерения емкости ЧЭВ. На водородосодержащей смеси наблюдается увеличение чувствительности к влаге. При чувствительности к водороду равной единице соотношение чувствительности к влаге и чувствительности к водороду достигает 1/12 и имеет максимум на концентрации H_2 0,2 % об.

2. Относительное (по отношению к исходному значению) изменение показаний ЧЭВ за 60 ч непрерывного измерения содержания H_2 в воздухе с концентрацией 0,27 % об., составляет не более 4,8 %. Относительное изменение показаний ВЧЭ за 60 ч непрерывного измерения содержания H_2 в азоте с концентрацией 0,46 % об. составляет не более 2,1 %.

Библиографический список

1. Джексон, Р. Р. Новейшие датчики / Р. Р. Джексон. – Москва : Техносфера, 2007. – 384 с.
2. Эггинс, Б. Химические и биологические сенсоры / Б. Эггинс. – Москва : Техносфера, 2005. – 336 с.
3. Korotcenkov, G. Review of electrochemical hydrogen sensors / G. Korotcenkov, S. D. Han, J. R. Stetter // Chem. Rev. – 2009. – Vol. 109 (3). – P. 1402–1433.
4. Игнатъева, Н. Датчики газа фирмы «Figaro» / Н. Игнатъева // Электроника: наука, технология, бизнес. – 2005. – № 2. – С. 34–37.
5. Никифорова, М. Ю. Интегральные сенсоры концентраций газов / М. Ю. Никифорова, Б. И. Подлепский // Датчики и системы. – 2002. – № 4. – С. 38–53.
6. Методы и средства измерения неэлектрических величин : учеб. пособие : в 2 ч. / П. Г Михайлов, А. А. Кичкидов, Г. В. Петрунин, В. Ф. Ульянов, И. О. Лапшин. – Пенза : Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2003. – Ч. 1. Физические принципы и методы измерения неэлектрических величин. – 112 с.

7. Коваленко, А. В. Характеристики и схемы включения МДП-транзисторных чувствительных элементов / А. В. Коваленко, М. Ю. Никифорова, Б. И. Подлепецкий // Датчики и системы. – 2008. – № 8. – С. 10–14.
8. Pd/Ag coated fiber Bragg grating sensor for hydrogen monitoring in power transformers / G. M. Ma, J. Jiang, C. R. Li, H. T. Song, Y. T. Luo, H. B. Wang // Review of Scientific Instruments. – 2015. – Vol. 86. – P. 045003.
9. Егоров, А. А. Применение интегрально-оптических датчиков для контроля опасных газообразных веществ / А. А. Егоров, М. А. Егоров, Т. К. Чехлова, А. Г. Тимакин // Датчики и системы. – 2008. – № 1. – С. 25–30.
10. Fisser, M. Optimizing the sensitivity of palladium based hydrogen sensors / M. Fisser, R. A. Badcock, P. D. Teal // Sensors and Actuators B Chemical. – 2018. – Vol. 259. – P. 10–19.
11. Михайлов, П. Г. Чувствительные элементы газовых сенсоров / П. Г. Михайлов, Л. А. Маринина // Датчики и системы. – 2005. – № 8. – С. 12–14.
12. Hübert, T. Hydrogen sensors – A review / T. Hübert, L. Boon-Brett, G. Black, U. Banach // Sensors and Actuators B Chemical. – 2011. – Vol. 157 (2). – P. 329–352.
13. Патрушева, Т. Н. Сенсорика. Современные технологии микро- и нанoeлектроники : учеб. пособие / Т. Н. Патрушева. – Красноярск : Сиб. федер. ун-т, 2013. – 264 с.
14. Элементы газочувствительных датчиков на основе микротехнологий / Ю. А. Воронов, М. Ю. Никифорова, А. В. Коваленко, Б. И. Подлепецкий, Н. Н. Саматаев, А. А. Васильев // Датчики и системы. – 2010. – № 1. – С. 28–36.
15. Egorov, A. A. Low-loss inexpensive integrated-optical waveguides as a sensitive gas sensor / A. A. Egorov, M. A. Egorov, T. K. Chekhlova, A. G. Timakin // ICO Topical Meeting on Optoinformatics/Information Photonics (September 15–18, 2008. St. Petersburg. Russia). – St. Petersburg : ИТМО, 2008. – P. 208–211.
16. Патент SU 1785049 H01L 21/336 Способ изготовления датчиков водорода на МОП транзисторах / Козин С. А., Маринина Л. А. ; опубл. 30.12.1990.
17. Михайлов, П. Г. Чувствительные элементы газовых сенсоров / П. Г. Михайлов, Л. А. Маринина // Датчики и системы. – 2005. – № 10. – С. 2–5.
18. Михайлов, П. Г. Микроэлектронные газочувствительные элементы / П. Г. Михайлов, Л. А. Маринина // Вооружение, безопасность, конверсия : тр. Междунар. науч.-техн. конф. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2004. – С. 56–63.
19. Каторгин, Б. И. Разработка и внедрение на мировой рынок мощного маршевого жидкостного ракетного двигателя РД180 / Б. И. Каторгин, В. И. Семенов, В. К. Чванов, Ф. Ю. Челькис // Наука и технологии в промышленности. – 2011. – № 1. – С. 33–39.

References

1. Dzhekson P. P. *Noveyshie datchiki* [The latest sensors]. Moscow: Tekhnosfera, 2007, 384 p. [In Russian]
2. Eggins B. *Khimicheskie i biologicheskie sensory* [Chemical and biological sensors]. Moscow: Tekhnosfera, 2005, 336 p. [In Russian]
3. Korotcenkov G., Han S. D., Stetter J. R. *Chem. Rev.* 2009, vol. 109 (3), pp. 1402–1433.
4. Ignat'eva N. *Elektronika: nauka, tekhnologiya, biznes* [Electronics: science, technology, business]. 2005, no. 2, pp. 34–37. [In Russian]
5. Nikiforova M. Yu., Podlepetskiy B. I. *Datchiki i sistemy* [Sensors and systems]. 2002, no. 4, pp. 38–53. [In Russian]
6. Mikhaylov P. G., Kichkidov A. A., Petrunin G. V., Ul'yanov V. F., Lapshin I. O. *Metody i sredstva izmereniya neelektricheskikh velichin: ucheb. posobie: v 2 ch.* [Methods and means of measuring non-electrical quantities: textbook. manual : in 2 parts]. Penza: Izd-vo Penz. gos. un-ta, 2003, part 1, 112 p. [In Russian]
7. Kovalenk A. B., Nikiforova M. Yu., Podlepetskiy B. I. *Datchiki i sistemy* [Sensors and systems]. 2008, no. 8, pp. 10–14. [In Russian]
8. Ma G. M., Jiang J., Li C. R., Song H. T., Luo Y. T., Wang H. B. *Review of Scientific Instruments*. 2015, vol. 86, p. 045003.
9. Egorov A. A., Egorov M. A., Chekhlova T. K., Timakin A. G. *Datchiki i sistemy* [Sensors and systems]. 2008, no. 1, pp. 25–30. [In Russian]
10. Fisser M., Badcock R. A., Teal P. D. *Sensors and Actuators B Chemical*. 2018, vol. 259, pp. 10–19.
11. Mikhaylov P. G., Marinina L. A. *Datchiki i sistemy* [Sensors and systems]. 2005, no. 8, pp. 12–14. [In Russian]
12. Hübert T., Boon-Brett L., Black G., Banach U. *Sensors and Actuators B Chemical*. 2011, vol. 157 (2), pp. 329–352.

13. Patrusheva T. N. *Sensorika. Sovremennye tekhnologii mikro- i nanoelektroniki: ucheb. posobie* [Sensors. Modern technologies of micro-and nanoelectronics: textbook]. Krasnoyarsk: Sib. feder. un-t, 2013, 264 p. [In Russian]
14. Voronov Yu. A., Nikiforova M. Yu., Kovalenko A. V., Podlepetskiy B. I., Samataev N. N., Vasil'ev A. A. *Datchiki i sistemy* [Sensors and systems]. 2010, no. 1, pp. 28–36. [In Russian]
15. Egorov A. A., Egorov M. A., Chekhlova T. K., Timakin A. G. *ICO Topical Meeting on Optoinformatics/Information Photonics (September 15–18, 2008. St. Petersburg. Russia)*. St. Petersburg: ITMO, 2008, pp. 208–211.
16. Patent SU 1785049 H01L 21/336 *Sposob izgotovleniya datchikov vodoroda na MOP tranzistorakh* [Patent SU 1785049 H01L 21/336 Method for manufacturing hydrogen sensors on MOSFETs]. Kozin S. A., Marinina L. A.; publ. 30.12.1990. [In Russian]
17. Mikhaylov P. G., Marinina L. A. *Datchiki i sistemy* [Sensors and systems]. 2005, no. 10, pp. 2–5. [In Russian]
18. Mikhaylov P. G., Marinina L. A. *Vooruzhenie, bezopasnost', konversiya: tr. Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf.* [Armament, security, conversion: proceedings of the international conference. scientific-technical conf.]. Penza: Izd-vo PGU, 2004, pp. 56–63. [In Russian]
19. Katorgin B. I., Semenov V. I., Chvanov V. K., Chel'kis F. Yu. *Nauka i tekhnologii v promyshlennosti* [Science and technology in industry]. 2011, no. 1, pp. 33–39. [In Russian]

Михайлов Петр Григорьевич

доктор технических наук, профессор,
ведущий научный сотрудник,
Пензенский государственный
технологический университет
(Россия, г. Пенза, ул. Байдукова/Гагарина 1а/11)
E-mail: pit_mix@mail.ru

Mikhaylov Petr Grigor'evich

doctor of technical sciences, professor,
leading researcher,
Penza State Technological University
(1a/11 Baydukova/Gagarina street, Penza, Russia)

Маринина Лариса Александровна

кандидат технических наук, преподаватель,
Пензенский филиал Военной академии
материально-технического обеспечения
имени генерала армии А. В. Хрулева
(Россия, г. Пенза, Военный городок, 1)
E-mail: pit_mix@mail.ru

Marinina Larisa Aleksandrovna

candidate of technical sciences, lecturer,
Penza branch of Military Academy
Logistics Support named after general
of the army A. V. Khruleva
(1 Voenny gorodok, Penza, Russia)

Глебова Татьяна Александровна

доцент,
кафедра информационно-вычислительных систем,
Пензенский государственный университет
архитектуры и строительства
(Россия, г. Пенза, ул. Германа Титова, 28)
E-mail: tan/1952@mail.ru

Glebova Tat'yana Aleksandrovna

associate professor,
sub-department of information and computer systems,
Penza State University
of Architecture and Construction
(28 Herman Titov street, Penza, Russia)

Базарбай Лашын

докторантка,
Казахский национальный технический
университет им. К. Сатпаева
(Казахстан, г. Алматы, ул. Сатпаева 22)
E-mail: lashyn_7754@mail.ru

Bazarbay Lashyn

doctoral student,
Kazakh National Technical University
named after K. Satpayev
(22 Satpaeva street, Almaty, Kazakhstan)

Соколов Александр Владимирович

главный специалист-эксперт,
инспекция Госстройнадзора
по Пензенской области
(Россия, г. Пенза, ул. Попова, 34а)
E-mail: sokoljv_av_avto@mail.ru

Sokolov Aleksandr Vladimirovich

chief specialist-expert,
inspection State Construction Supervision
in the Penza region
(34a Popova street, Penza, Russia)

Аналиева Ажар Уразбаевна

преподаватель,

Казахстанский университет инновационных

и телекоммуникационных систем

(Казахстан, г. Уральск, ул. М. Маметовой, 81)

E-mail: azhara_1980@mail.ru

Analieva Azhar Urazbaevna

lecturer,

Kazakhstan University of Innovative

and Telecommunication Systems

(81 M. Mametovoy street, Uralsk, Kazakhstan)

Образец цитирования:

Чувствительные элементы водорода. Методы преобразования и базовые конструкции / П. Г. Михайлов, Л. А. Маринина, Т. А. Глебова, Л. Базарбай, А. В. Соколов, А. У. Аналиева // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2020. – № 2 (32). – С. 38–47. – DOI 10.21685/2307-5538-2020-2-5.