

МОНИТОРИНГ И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПРИРОДНЫХ И ТЕХНОГЕННЫХ РИСКОВ

Научная статья

УДК 614.849; DOI: 10.61260/2307-7476-2024-1-6-15

МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОПТИМАЛЬНОЙ ВЫСОТЫ ГАЗОАНАЛИЗАТОРА ПРИ МАЛЫХ УТЕЧКАХ ВОДОРОДОСОДЕРЖАЩЕГО ГАЗА

✉ Ребезов Сергей Александрович;

Тимошенко Артем Леонидович.

Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, Санкт-Петербург, Россия

✉ srebezoff@gmail.com

Аннотация. На сегодняшний день не полностью изучены меры безопасности при хранении водорода в сжиженном или газообразном состоянии, требования к помещениям хранения этого вещества, необходимое оборудование, которое должно устанавливаться в таких помещениях. Целью данной работы является определение оптимальной высоты расположения газоанализатора в относительно герметичном невентилируемом помещении, в котором размещено технологическое оборудование по производству водородосодержащего газа и возможны его малые утечки. Проведен модельный эксперимент по измерению концентрации водородосодержащей смеси на различных высотах над местом утечки. Разработан метод определения оптимальной высоты газоанализатора над местом утечки. Получены данные по изменению концентрации водородосодержащей смеси на различных высотах над местом утечки. Выявлена оптимальная высота расположения газоанализатора при малых утечках водородосодержащего газа и технологического оборудования.

Ключевые слова: водород, водородосодержащий газ, газоанализатор, концентрация, оптимальная высота расположения, малые утечки

Для цитирования: Ребезов С.А., Тимошенко А.Л. Метод определения оптимальной высоты газоанализатора при малых утечках водородосодержащего газа // Природные и техногенные риски (физико-математические и прикладные аспекты). 2024. № 1 (49). С. 6–15. DOI: 10.61260/2307-7476-2024-1-6-15.

Scientific article

METHOD FOR DETERMINING THE OPTIMAL HEIGHT OF THE GAS ANALYZER FOR SMALL LEAKS OF HYDROGEN-CONTAINING GAS

✉ Rebezov Sergey A.;

Timoshenko Artem L.

Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia, Saint-Petersburg, Russia

✉ srebezoff@gmail.com

Abstract. To date, safety measures for storage of hydrogen in liquefied or gaseous state, requirements to storage rooms of this substance, necessary equipment to be installed in such rooms are incompletely studied. At small hydrogen leaks there is an explosion and fire hazard consisting in formation of explosive clouds for a long period of time, in some cases the formation of local clouds of explosive hydrogen-air mixtures automatic gas analyzers cannot fix. The purpose of this work is to determine the optimal height of the gas analyzer in a relatively airtight, unventilated room in which technological equipment for the production of hydrogen-containing gas is located and its small leaks are possible. The model experiment on measuring the concentration of hydrogen-containing mixture at different heights above

the leakage place was carried out. A method of determining the optimal height of the gas analyzer above the leakage site was developed. The data on changes in the concentration of hydrogen-containing mixture at different heights above the leakage site were obtained. The optimum height of the gas analyzer location at small leaks of hydrogen-containing gas and technological equipment is revealed.

Keywords: hydrogen, hydrogen-containing gas, gas analyzer, concentration, optimum height of location, small leaks

For citation: Rebezov S.A., Timoshenko A.L. Method for determining the optimal height of the gas analyzer for small leaks of hydrogen-containing gas // *Prirodnye i tekhnogennye riski (fiziko-matematicheskie i prikladnye aspekty) = Natural and man-made risks (physico-mathematical and applied aspects)*. 2024. № 1 (49). P. 6–15. DOI: 10.61260/2307-7476-2024-1-6-15.

Введение

Современную промышленность невозможно представить без использования технических газов в разных отраслях производства. Водород – один из самых востребованных промышленностью газов, он занимает третье место после кислорода и азота по количеству вырабатываемого сырья. Безусловно, водород является одним из важнейших видов сырья нефтехимической и химической промышленности. Без этого газа не обходятся такие промышленные отрасли, как металлургическая, пищевая, стекольная, электронная, электротехническая. На данный момент водород рассматривают как универсальный теплоноситель и аккумулятор энергии. Перспективным является использование водорода в качестве топлива для автотранспорта, авиации. Он имеет высокую теплоту сгорания, в три раза большую, чем теплота сгорания углеводородных газов (120 МДж/кг) [1].

Потребности общества в энергетических ресурсах постоянно растут, в будущем количество привычных энергоносителей не сможет удовлетворить нужды промышленности [2]. Это связано с тем, что сырье для получения природного газа, угля и горючего в транспортных средствах является ограниченным, а для получения водорода используется вода, она доступна в огромных количествах на большинстве территорий, что позволит уменьшить влияние географических факторов для получения энергоносителя.

Следует подчеркнуть, что водород является экологически чистым энергоносителем, при сгорании не выделяет в атмосферу оксиды углерода, азота, серы и других вредных веществ, которые вызывают нарушения в природе [3].

Водород имеет уникальные свойства (некоторые из них перечислены выше), которые стимулируют промышленность на использование именно этого вещества, но есть и довольно опасные свойства этого газа, которые определяют строгие меры безопасности при работе с ним и его хранении [4].

Для выделения большинства мер безопасности необходимо знать особенности поведения водорода, его теплофизические и термодинамические свойства [5]. Вещество имеет низкую энергию зажигания (0,017 МДж), высокую скорость горения в воздухе (2,7 м/с), широкую взрывопожарную область (4,1–75,0 % об.) [6]. Эти особенности сдерживают применение водорода в большинстве отраслей промышленности [2]. Существует проблема в использовании нынешних резервуаров и трубопроводов, большинство из них изготовлено для оборота природного газа. Следовательно, герметичность запорной арматуры не может соответствовать требованиям по герметичности водорода [7].

При малых утечках водорода существует взрывопожарная опасность, заключающаяся в образовании взрывоопасных облаков за большой промежуток времени, в некоторых случаях образование локальных облаков взрывоопасных водородно-воздушных смесей автоматические газоанализаторы зафиксировать не могут.

В ходе проведения исследования будут решены следующие задачи: описание процессов при малой утечке водородно-кислородной смеси, проведение ряда опытов, направленных на установление оптимальной высоты газоанализатора, разработка рекомендаций по размещению газоанализатора в относительно герметичном помещении.

Методы исследования

В данной работе методом исследования является эксперимент.

Исследования по смежной теме проводились в диссертации «Метод гибкой оценки пожарной опасности аккумуляторных помещений» [8], где описан эксперимент утечки водорода при малых скоростях истечения в вентилируемом помещении, приближенному к помещению аккумуляторной. Сформулированы следующие выводы: существенное влияние оказывает негерметичность помещения, получена формула для расчета среднеобъемной концентрации водорода в относительно герметичном помещении, разработан метод гибкой оценки пожарной опасности аккумуляторных помещений.

Для реализации опыта используется следующее оборудование: водородный газоанализатор «Сигнал-4М», лабораторный электролизер DIY (рис. 1), лабораторный блок питания «YIZHAN» (рис. 2), ротаметр РМ-А-0.063 ГУЗ, метровая линейка «Зубр», секундомер.

Газоанализатор «Сигнал-4М» предназначен для поиска водорода в окружающей среде. Он измеряет концентрацию взрывоопасных газов и паров в процентах от нижнего концентрационного предела распространения пламени (НКПР) водорода (4 %) после прогрева. Разрешение шкалы – 0,8 %, основная абсолютная погрешность – не более 5 %, дополнительная погрешность – 2,5 % на каждые 10° изменения температуры. При достижении отметки 20 % от НКПР газоанализатор издает прерывистый звуковой сигнал [5].

Лабораторный электролизер DIY состоит из 13 пластин из нержавеющей стали, 14 прокладок из резины, двух пластин из оргстекла, болтовых стяжек (рис. 1).

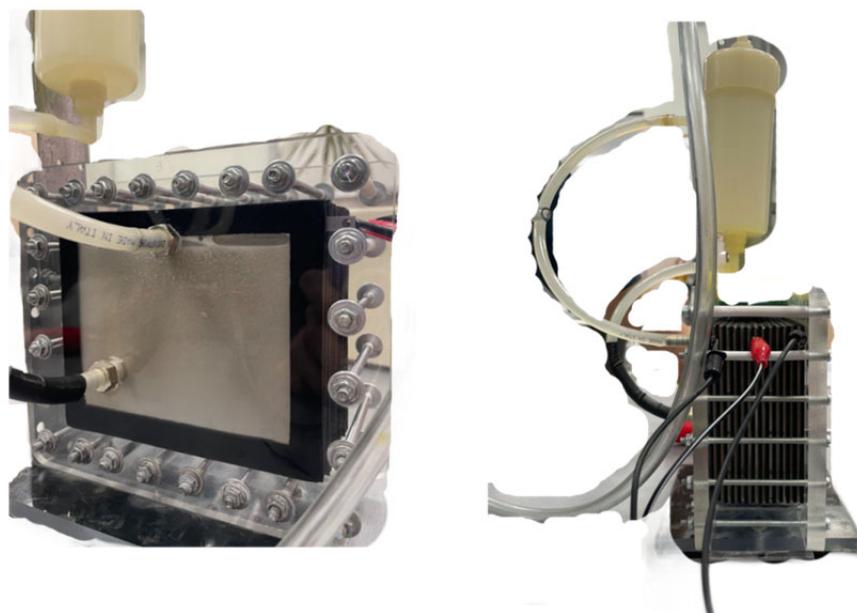


Рис. 1. Внешний вид DIY лабораторного электролизера, используемого в эксперименте

Он располагается на горизонтальной металлической пластине, покрытой оргстеклом, размерами 12×14 см, к которой прикреплена вертикальная пластина высотой 49 см; на высоте 25 см прикреплена цилиндрическая емкость диаметром 4,5 см, высотой 11 см. Из нижней части бака, наполненного 10 % раствором щелочи KOH, подводится шланг к электролизеру, наполняя его жидкостью; к верхней части электролизера прикреплен шланг, ведущий к верхней боковой части бака, через который водород поступает в емкость; из верхнего шланга водород поступает в окружающую среду. Напряжение на электролизер подается с помощью лабораторного блока питания «YIZHAN» (рис. 2). Прибор имеет выходное напряжение до 30 В, максимальную силу тока равную 5 А. Электролизер основан на химическом разложении воды или раствора щелочи на ионы.



Рис. 2. Лабораторный блок питания «YIZHAN»

Электролизер – это специальная установка, применяемая для выделения из раствора или расплава его составляющих. От источника питания на электроды всех ячеек установки подается напряжение. В результате протекания процесса электролиза к отрицательно заряженному катоду притягиваются анионы растворенного в воде вещества, в результате чего на нем образуется тонкая пленка натрия. На положительно заряженном аноде происходит разрушение молекул воды, при этом из каждой образуется два атома водорода и один атом кислорода. Выделяющийся газ по отводным патрубкам попадает в предназначенную для него емкость. Интенсивность процесса электролиза зависит от величины напряжения и силы тока – при малых значениях данных характеристик процесс протекать не будет. Если источник питания будет подавать ток со слишком большими значениями вольт-амперной характеристики, заливаемый в электролизер раствор будет сильно нагреваться и выкипать.

Опыт осуществляется в помещении размерами 6×3,5×3 м. Лабораторный электролизер располагается на столе высотой 90 см. Трубка, из которой выходит газовая смесь, приподнята на 10 см над уровнем стола. Измерения концентрации водорода в воздухе проводятся в течение 5 мин на четырех высотах: 70 см, 50 см, 30 см и 10 см над уровнем трубки. В таблицу записываются момент времени, на котором изменилась концентрация водорода, и концентрация водорода в воздухе. Выделяющаяся газовая смесь поднимается вверх под потолок в силу того, что водород легче воздуха, при этом частицы газов диффундируют с воздухом.

Стоит отметить, что измерение концентрации водорода на уровне выше 70 см неэффективно, так как газоанализатор не изменяет показателей концентрации.

НКПР водорода равен 4,12 % от объема помещения или 3345,1 мг/м³ [9].

Результаты исследования и их обсуждение

В табл. 1–4 представлены полученные в ходе эксперимента значения изменения концентрации водородосодержащего газа (ВСГ) (в процентах от НКПР).

Таблица 1

Изменение концентрации водорода H₂ в процентах от НКПР на высоте 70 см

H = 70 см					
t, с	0–105	106	107–109	110	111–300
φ от НКПР, %	0	0,8	0	0,8	0

Таблица 2

Изменение концентрации водорода H_2 в процентах от НКПР на высоте 50 см

H = 50 см											
t, с	0–48	48	49–58	59	60–67	68	69	70	71–89	90	90–300
φ от НКПР, %	0	0,8	0	1,6	0	2,4	0	3,2	0	1,6	0
t, с	107	108–122	123	124–149	150	151–300					
φ от НКПР, %	1,6	0	0,8	0	0,8	0					

Таблица 3

Изменение концентрации водорода H_2 в процентах от НКПР на высоте 30 см

H = 30 см					
t, с	0–105	106	107–109	110	111–300
φ от НКПР, %	0	0,8	0	0,8	0

Таблица 4

Изменение концентрации водорода H_2 в процентах от НКПР на высоте 10 см

H = 10 см											
t, с	10	11–13	14	15–19	20	21–22	23	24–25	26	27–28	29
φ от НКПР, %	1,6	0	3,2	0	4,0	0	7,2	0	4,8	0	6,4
t, с	34	35–39	40	41–49	50	51	52	53–56	57	58–61	62
φ от НКПР, %	7,2	0	8,8	0	0,8	0	11,2	0	14,4	0	17,6
t, с	124	125–130	131	132–134	135	136–201	202	203–294	295	296–300	
φ от НКПР, %	8,8	0	18,4	0	27,4	0	8,8	0	19	0	

В табл. 5 приведены соотношения величин концентрации газообразного водорода в характерных значениях для более ясного представления табл. 1.

Таблица 5

Конвертация концентрации H_2

φ от НКПР, %	% объемных долей	мг/м ³	ppm
10	0,4	334,5	4 000
25	1	836,3	10 000
50	2	1 672,5	20 000
75	3	2 508,8	30 000

По полученным данным построены графики зависимости концентрации ВСГ от времени при малом истечении ВСГ с объемным расходом, равным 0,013 м³/ч, значение которого было получено поверенным ротаметром (рис. 3). Данное значение приближено к значению расхода (истечения) ВСГ при зарядке аккумуляторов.



Рис. 3. Объёмный расход DIU электролизера, измеренный ротаметром РМ-А-0.063 ГУЗ

Помещения с категорией по взрывопожароопасности А, где предусматривается обращение водорода, должны обеспечиваться автоматическими газоанализаторами со звуковой и световой сигнализацией при концентрации водорода в воздухе, равной не более 10 % от НКПР. Компрессорные, наполнительные, помещения электролиза, очистки и осушки H_2 оборудуются газоанализаторами с возможностью подачи предупреждающего сигнала при концентрации водорода 10 % и аварийного отключения при 25 % от НКПР. При последней концентрации предусматривается остановка технологического процесса [10]. Соответственно, $\varphi_{\text{сигн}} = 10\%$ от НКПР и $\varphi_{\text{откл}} = 25\%$ от НКПР.

На рис. 4 при расположении газоанализатора на высоте 70 см максимальное значение концентрации газообразного водорода составляет 0,8 % от НКПР при значениях времени 106 и 110 сек., значения не превышают $\varphi_{\text{сигн}}$ и $\varphi_{\text{откл}}$.

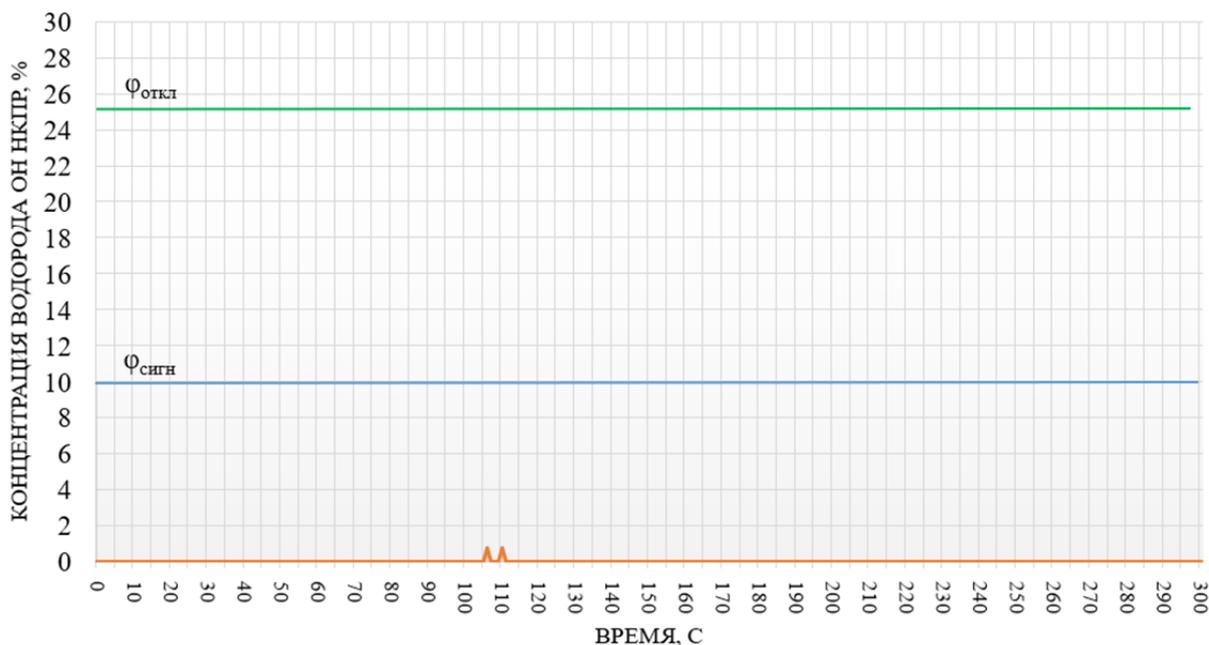


Рис. 4. График изменения значений концентрации ВСГ, зафиксированных на высоте 70 см от источника утечки ВСГ

На рис. 5 при расположении газоанализатора на высоте 50 см максимальное значение концентрации газообразного водорода составляет 3,2 % от НКПР при значении времени 70 сек., значения не превышают $\varphi_{\text{сигн}}$ и $\varphi_{\text{откл}}$.

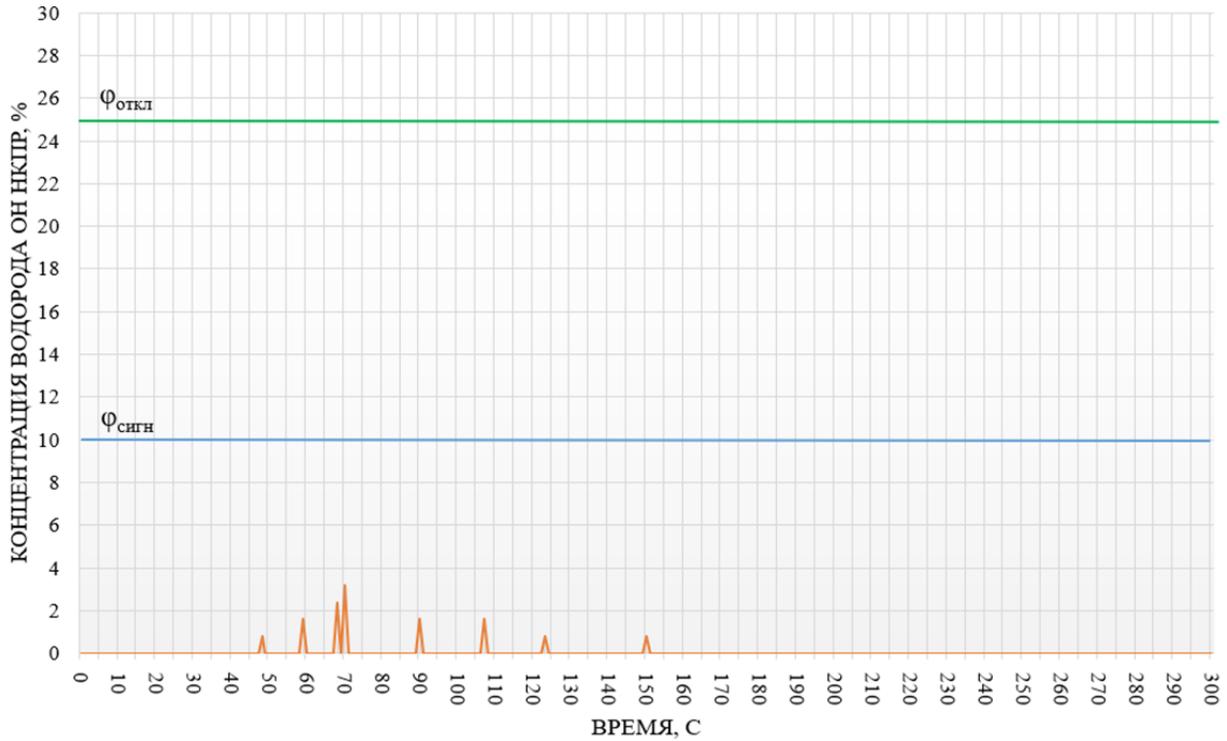


Рис. 5. График изменения значений концентрации ВСГ, зафиксированных на высоте 50 см от источника утечки ВСГ

На рис. 6 при расположении газоанализатора на высоте 30 см максимальное значение концентрации газообразного водорода составляет 7,2 % от НКПР при значении времени 222 сек., значения не превышают $\varphi_{\text{сигн}}$ и $\varphi_{\text{откл}}$.

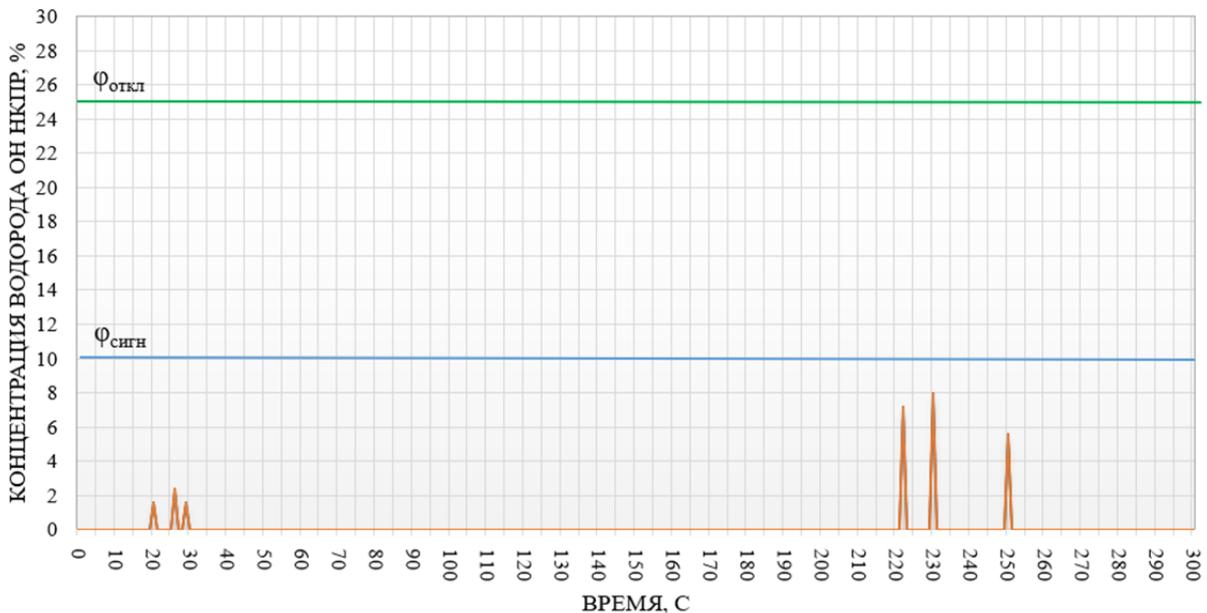


Рис. 6. График изменения значений концентрации ВСГ, зафиксированных на высоте 30 см от источника утечки ВСГ

На рис. 7 при расположении газоанализатора на высоте 10 см максимальное значение концентрации газообразного водорода составляет 27,4 % от НКПР при значении времени 135 сек., значения не превышают $\varphi_{\text{сигн}}$ и $\varphi_{\text{откл.}}$. Следовательно, газоанализатор зарегистрирует утечку.

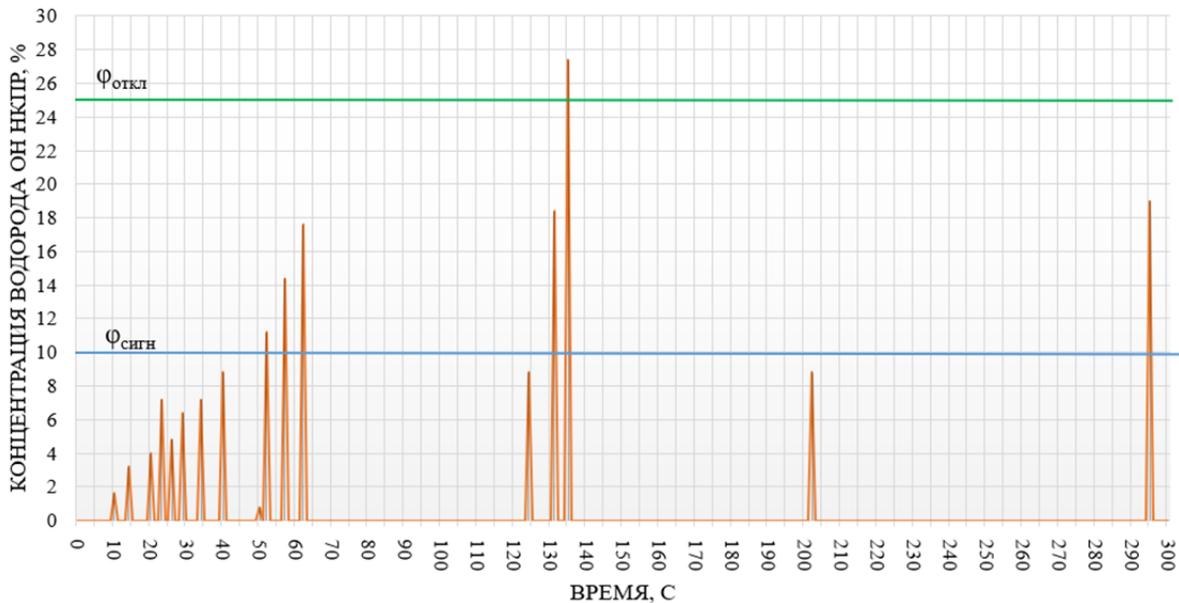


Рис. 7. График изменения значений концентрации ВСГ, зафиксированных на высоте 10 см от источника утечки ВСГ

Заключение

Таким образом, при рассмотрении вопросов по выбору высоты размещения газоанализатора в невентилируемом помещении, в котором присутствует водородное технологическое оборудование (например, помещение зарядки аккумуляторов) и возможны малые утечки ВСГ (примерно равные расходу $0,013 \text{ м}^3/\text{ч}$), целесообразно располагать газоанализатор на высоте не более 10 см над возможным источником утечки (технологическим агрегатом).

При размещении газоанализатора выше отметки 10 см он не регистрирует образование локальных облаков взрывоопасных водородно-воздушных смесей, соответственно, не сработает звуковая и световая сигнализация и отключение технологического оборудования. Так, при рассмотрении рис. 1–3 ломаная линия изменения концентрации ВСГ не превышает отметку 10 % от НКПР, в то время как на рис. 4 происходит множественное пересечение отметки 10 % от НКПР и однократное пересечение 25 % от НКПР. Это значит, что для высот расположения газоанализатора 30 см, 50 см и 70 см датчик не способен зарегистрировать малые утечки, по причине сравнительно высокого коэффициента диффузии $D = 0,66 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$ [11].

Список источников

1. Кириллов И.А. Симоненко В.А., Харитонов Н.Л. Проблемы нормативного, экспериментального и расчетно-теоретического обеспечения безопасности водородной энергетики // Российские нанотехнологии. 2020. Т. 15. № 3. С. 402–414. DOI: 10.1134/S1992722320030061. EDN AACMQR.
2. Гамбург Д.Ю., Семенов В.П., Дубровкин Н.Ф. Водород. Свойства, получение, хранение, транспортирование, применение. М.: Химия, 1989. 672 с.
3. Об утверждении Концепции развития водородной энергетики в Российской Федерации: распоряжение Правительства Рос. Федерации от 5 авг. 2021 г. № 2162-р. Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».

4. Пожароопасность альтернативных топлив / С.В. Захаров [и др.] // Инновационные технологии в АПК, как фактор развития науки в современных условиях: сб. статей Междунар. науч.-исслед. конф., посвящ. 70-летию создания факультета ТС в АПК (МЭХ ФАК). Омск: Омский гос. аграрный ун-т им. П.А. Столыпина, 2020. С. 394–398. EDN CJGGEC.
5. Газоанализатор СИГНАЛ-4М: руководство по эксплуатации. Смоленск. 17 с.
6. Васюков Г.В., Кожин П.А. Анализ исследований пожарной опасности водорода при нормальных условиях // Пожаровзрывобезопасность. 2010. Т. 19. № 7. С. 4–21. EDN MUJTBX.
7. Тимошенко А.Л., Самигуллин Г.Х. Текучесть – взрывопожароопасное свойство водорода // Сервис безопасности в России: опыт, проблемы, перспективы. Арктика – регион стратегических интересов: правовая политика и современные технологии обеспечения безопасности в Арктическом регионе: материалы Междунар. науч.-практ. конф. СПб.: С.-Петербург. ун-т ГПС МЧС России, 2022. С. 289–292. EDN RNAEFV.
8. Никонова Е.В. Метод гибкой оценки пожарной опасности аккумуляторных помещений: дис. ... канд. техн. наук. М., 2003. 173 с.
9. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов и средства их тушения: справ. изд.: в 2-х кн. / А.Н. Баратов [и др.]. М., Химия, 1990. 496 с.
10. Правила безопасности при производстве водорода методом электролиза воды П68 (ПБ 03-598-03). Сер. 03. Вып. 37. 3-е изд., испр. М.: ЗАО «Научно-технический центр исследований проблем промышленной безопасности», 2014. 110 с.
11. Кошкин Н.Н., Ширкевич М.Г. Справочник по элементарной физике. М.: Наука, 1976. 256 с.

References

1. Kirillov I.A., Simonenko V.A., Haritonova N.L. Problemy normativnogo, eksperimental'nogo i raschetno-teoreticheskogo obespecheniya bezopasnosti vodorodnoj energetiki // Rossijskie nanotekhnologii. 2020. T. 15. № 3. S. 402–414. DOI: 10.1134/S1992722320030061. EDN AACMQR.
2. Gamburg D.Yu., Semenov V.P., Dubrovkin N.F. Vodorod. Svoystva, poluchenie, hranenie, transportirovanie, primenenie. M.: Himiya, 1989. 672 s.
3. Ob utverzhdenii Konceptii razvitiya vodorodnoj energetiki v Rossijskoj Federacii: Rasporyazhenie Pravitel'stva Ros. Federacii ot 5 avg. 2021 g. № 2162-r. Dostup iz sprav.-pravovoj sistemy «Konsul'tantPlyus».
4. Pozharoopasnost' al'ternativnyh topliv / S.V. Zaharov [i dr.] // Innovacionnye tekhnologii v APK, kak faktor razvitiya nauki v sovremennyh usloviyah: sb. statej Mezhdunar. nauch.-issled. konf., posvyashch. 70-letiyu sozdaniya fakul'teta TS v APK (MEKH FAK). Omsk: Omskij gos. agrarnyj un-t im. P.A. Stolypina, 2020. S. 394–398. EDN CJGGEC.
5. Gazoanalizator SIGNAL-4M: rukovodstvo po ekspluatatsii. Smolensk. 17 s.
6. Vasyukov G.V., Kozhin P.A. Analiz issledovanij pozharnoj opasnosti vodoroda pri normal'nyh usloviyah // Pozharovzryvobezopasnost'. 2010. T. 19. № 7. S. 4–21. EDN MUJTBX.
7. Timoshenko A.L., Samigullin G.H. Tekuchest' – vzryvopozharoopasnoe svojstvo vodoroda // Servis bezopasnosti v Rossii: opyt, problemy, perspektivy. Arktika – region strategicheskikh interesov: pravovaya politika i sovremennye tekhnologii obespecheniya bezopasnosti v Arkticheskom regione: materialy Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. SPb.: S.-Peterb. un-t GPS MCHS Rossii, 2022. S. 289–292. EDN RNAEFV.
8. Nikonova E.V. Metod gibkoj ocenki pozharnoj opasnosti akumuljatornyh pomeshchenij: dis. ... kand. tekhn. nauk. M., 2003. 173 s.
9. Pozharovzryvopasnost' veshchestv i materialov i sredstva ih tusheniya: sprav. izd.: v 2-h kn. / A.N. Baratov [i dr.]. M., Himiya, 1990. 496 s.
10. Pravila bezopasnosti pri proizvodstve vodoroda metodom elektroliza vody P68 (ПБ 03-598-03). Ser. 03. Vyp. 37. 3-е изд., испр. М.: ЗАО «Научно-технический центр исследований проблем промышленной безопасности», 2014. 110 с.
11. Koshkin N.N., Shirkevich M.G. Spravochnik po elementarnoj fizike. M.: Nauka, 1976. 256 s.

Информация о статье:

Поступила в редакцию: 06.10.2023

Принята к публикации: 14.01.2024

The information about article:

Article was received by the editorial office: 06.10.2023

Accepted for publication: 14.01.2024

Информация об авторах:

Ребезов Сергей Александрович, обучающийся Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России (196106, Санкт-Петербург, Московский пр., д. 149), e-mail: srebezoff@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0000-6636-2520>

Тимошенко Артем Леонидович, адъюнкт Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России (196105, Санкт-Петербург, Московский пр., д. 149), e-mail: artem18181@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-3927-5613>, SPIN-код: 6923-0111

Information about the authors:

Rebezov Sergey A., student of Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia (196106, Saint-Petersburg, Moskovsky ave., 149), e-mail: srebezoff@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0000-6636-2520>

Timoshenko Artem L., postgraduate student of Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia (196105, Saint-Petersburg, Moskovsky ave., 149), e-mail: artem18181@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-3927-5613>, SPIN: 6923-0111