

**БЕЗОПАСНОСТЬ ПРИ РАБОТЕ С ВОДОРОДОМ*****П.Б. Шелищ, А.Ю. Раменский***Национальная ассоциация водородной энергетики – НП НАВЭ
101000, Москва, Сретенский б-р, д. 6/1, стр.1
Тел. 8 (495) 729-46-36, 292-90-42, 692-48-83, 232-23-34, e-mail: ramenskiy@gmail.com

Заключение совета рецензентов: 23.09.09 Заключение совета экспертов: 28.09.09 Принято к публикации: 04.10.09

Эта публикация посвящена разработке нового законодательства и правил техники безопасности в области водородных технологий. Для промышленности нашей страны в настоящее время характерно крупномасштабное производство водорода. Современная законодательная и нормативно-техническая база в сфере водородных технологий сегодня формируется с учетом как отечественного, так и международного опыта. Одним из основных элементов законодательного регулирования является разработка требований к оборудованию в зависимости от объемов хранения водорода. Создание российских стандартов, основанных на стандартах Международной организации по стандартизации и Международной электротехнической комиссии, является первым шагом в формировании новой национальной системы технического регулирования в области безопасного использования водородных технологий.

Ключевые слова: водород, безопасность, техническое регулирование, коды, стандарты, директивы.

SAFETY OF WORK WITH HYDROGEN***P.B. Shelisch, A.Yu. Ramenskiy***National Hydrogen Energy Association – NHEA
6/1 Sretenskii bulvar, Moscow, 101000, Russia
Tel. 8 (495) 729-46-36, 292-90-42, 692-48-83, 232-23-34, e-mail: ramenskiy@gmail.com

Referred: 23.09.09 Expertise: 28.09.09 Accepted: 04.10.09

This publication is devoted to the creation of a new legislation and safety code for hydrogen technologies. Our country's industry has been characterized by large-scale production of hydrogen. Due to our experience and also to the experience of foreign countries the necessity to develop a safety code and regulation is imminent. A key element of this law is the identification of the specific requirements for different equipment depending on the hydrogen storage volume. The creation of Russian standards based on the standards of the International Organization of Standardization and the International Electrotechnical Commission is the first step in founding a new national system of standardization and safety legislation for hydrogen technologies.

*Петр Борисович
Шелищ*

Президент Национальной ассоциации водородной энергетики (НП НАВЭ, Россия), инженер-физик, канд. филос. наук.

*Александр Юрьевич
Раменский*

Вице-президент Национальной ассоциации водородной энергетики (НП НАВЭ, Россия), инженер-механик, канд. техн. наук.

Безопасность и экономическая целесообразность являются, соответственно, необходимым и достаточным условием массового использования водородных технологий в энергетике, на транспорте и в промышленности. Можно представить себе формирование водородной экономики в ситуации, когда привлека-

тельность новых проектов для бизнеса обеспечивается не столько за счет рыночного спроса, сколько благодаря государственной поддержке, но никакое государство не позволит реализовать даже самые высокорентабельные проекты, если не гарантирован приемлемый уровень их безопасности. По отноше-

нию к водороду это особенно актуально, поскольку история его использования в технических устройствах и системах дает яркие примеры катастрофических последствий недооценки его опасных свойств, начиная с трагедии дирижабля «Граф Гинденбург», сгоревшего в 1937 г. над Нью-Йорком.

Хотя по оценке ведущих специалистов Института водородной энергетики РНЦ «Курчатовский институт» И.А. Кириллова и С.В. Коробцева, «риск аварии с участием водорода имеет тот же порядок величины, что и аварий с современными углеводородными топливами (жидкими и газообразными)» [1], нерешенность вопросов технического регулирования, и прежде всего требований к безопасности устройств и систем, предназначенных для производства, хранения, транспортировки и использования водорода, включая топливные элементы, становится сейчас существенным препятствием для развития водородных технологий как в России, где в 1970-1980-х гг. был создан значительный задел в этой области, так и в других развитых странах. Уникальный отечественный опыт нормирования безопасности при работе с водородом формировался в основном в ракетной и химической отраслях на крупномасштабных объектах в условиях слабых ресурсных ограничений (в виде отраслевых норм и правил) и мало применим для бытовых автономных энергоустановок или автомобилей, использующих водород в качестве топлива, и для необходимой им инфраструктуры производства, хранения и транспортировки водорода, обслуживания и ремонта водородных устройств и систем. Точнее, перенос этого опыта на условия массового использования водородных технологий просто лишил бы водородную экономику какой-либо перспективы. Но и отсутствие нормативной базы, основу которой в соответствии с федеральным законом «О техническом регулировании» должен составить специальный технический регламент, отнюдь не способствует формированию российской водородной экономики.

Это обстоятельство побудило Национальную ассоциацию водородной энергетики совместно с Национальной инновационной компанией «Новые энергетические проекты» и профильными комитетами Государственной Думы организовать подготовку проекта федерального закона – технического регламента по безопасности водородных устройств и систем [2]. При этом разработчики опирались как на отечественный, так и на немалый зарубежный опыт последних лет, подтверждающий необходимость дифференциации требований к оборудованию в зависимости от количества используемого, транспортируемого, хранящегося или производимого им водорода.

Что касается отечественного опыта нормативного регулирования вопросов безопасности при работе с водородом, то наиболее полным его воплощением стали действующие в настоящее время в соответствии с федеральным законом «О промышленной безопасности» Правила безопасности при производ-

стве водорода методом электролиза воды, утвержденные постановлением Госгортехнадзора России от 6 июня 2003 г. № 75 [3]. Эти Правила предназначены для применения:

- при проектировании, строительстве, эксплуатации, расширении, реконструкции, техническом перевооружении, консервации и ликвидации опасных производственных объектов, связанных с получением, обращением, применением и хранением электролитического водорода и кислорода;

- при изготовлении, монтаже, наладке, обслуживании и ремонте установок получения водорода и кислорода методом электролиза воды, а также другого оборудования, связанного с обращением и хранением водорода;

- при проектировании, эксплуатации, консервации и ликвидации зданий и сооружений, связанных с получением, обращением, применением и хранением электролитического водорода и кислорода;

- при проведении экспертизы промышленной безопасности опасных производственных объектов, связанных с получением, обращением, применением и хранением электролитического водорода и кислорода.

В правоприменительной практике технического регулирования и надзора нормы указанных Правил используются не только для электролизных производств. За отсутствием аналогичных нормативных документов для других водородных технологий большинство этих норм применяется и к его производству другими способами, и к его транспортировке и хранению.

Несмотря на то, что Правила утверждены относительно недавно, они ориентированы только на крупномасштабное производство, хранение, транспортировку и использование водорода. Это наглядно демонстрирует, прежде всего, установленная Правилами классификация устройств и систем, содержащих емкости водорода под давлением, по количеству содержащегося в них водорода.

В устройствах и системах первой (низшей) категории расчетное количество водорода не превышает его количество в 80 сорокалитровых баллонах под давлением 15 мПа, что в пересчете составляет 480 нормальных кубических метров (нм^3), или приблизительно 40 кг.

Вторая категория – от 80 до 500 таких баллонов (то есть до 3000 нм^3 , или приблизительно 250 кг).

Третья категория – от 500 до 1500 баллонов (до 9000 нм^3 , или приблизительно 750 кг).

Четвертая категория – свыше 1500 баллонов.

Эта классификация применяется, в частности, для нормирования расстояний от мест хранения (складов) баллонов до производственных зданий, а также до жилых и общественных зданий. При этом минимальное безопасное расстояние до производственных зданий в зависимости от категории склада может изменяться от 15 до 30 м, а до жилых и общественных зданий должно быть не менее 100 м независимо от емкости склада.

Такие жесткие нормы не учитывают современных тенденций развития водородных технологий в направлении, прежде всего, массовости и широкого проникновения в потребительскую сферу и малый бизнес. Получается так, что они распространяются и на металлгидридные аккумуляторы, применяемые в мобильных телефонах и ноутбуках, и на детские игрушки вроде водородного автомобиля на топливных элементах с миниатюрной заправочной станцией, оснащенной электролизером для разложения воды на водород и кислород. Но куда серьезнее то, что эти нормы ставят вне закона использование в городах настоящих водородных автомобилей, оснащенных баллонами высокого давления, поскольку они не смогут свободно перемещаться по городским улицам и парковаться у жилых и общественных зданий, и, тем более, строительство в населенных пунктах водородных автозаправочных станций.

В похожую ситуацию наша страна уже попадала в восьмидесятых годах прошлого века, когда наличие подобных жестких норм стало существеннейшим препятствием для массового перевода автомобильного транспорта на более дешевое и экологически чистое топливо – природный газ. Одним из главных сдерживающих факторов оказалось то, что заправочные автомобильные газонаполнительные компрессорные станции (АГНКС) можно было строить, как правило, вне городской черты, вдали от автотранспортных предприятий, обслуживающих город, и самого массового потребителя – населения.

Как результат, сегодня Россия по уровню газификации транспорта находится в четвертом десятке стран, а например, Аргентина, где АГНКС разрешается строить на центральных улицах городов, находится на одном из первых мест. Пару десятков лет назад все было наоборот.

Зарубежный опыт в области нормирования безопасности водородных устройств и систем может помочь нам преодолеть и растущее отставание в использовании водорода. Международные и национальные организации разработали, внедрили и уже широко используют нормативную техническую базу для применения водорода в малых водородных устройствах и системах.

В качестве положительного примера можно привести здесь стандарт Национальной ассоциации пожарной защиты США NFPA 50A [4], в котором представлены требования по пожарной безопасности для устройств и систем, использующих водород (1999 г.), прежде всего потому, что в нем введена более детальная классификация устройств и систем по объему находящегося в них сжатого водорода.

Первая категория в этой классификации предусматривает содержание водорода в баллонах под давлением в количестве менее 99 нм^3 , или приблизительно 8 кг водорода, то есть в 5 раз меньше, чем верхняя граница первой категории по Правилам Госгортехнадзора. Для этой категории расстояние от водородных емкостей до стены постороннего для них

здания может изменяться от 0 до 3,1 м в зависимости от материала стены здания.

Вторая категория – от 99 до 425 нм^3 (приблизительно 35 кг, или 70 баллонов). Для этой категории расстояние от водородных емкостей до стены здания может изменяться от 1,5 до 7,6 м в зависимости от материала стены здания.

Третья категория – свыше 425 нм^3 . Для этой категории складов с водородными емкостями расстояние от склада до стены здания может изменяться от 1,5 до 15,2 м в зависимости от материала стены здания.

Эта классификация и основанные на ней пространственные нормы, полагаем, сыграли существенную роль в том, что в настоящее время в США сосредоточена большая часть всех построенных в мире водородных автозаправочных станций, причем некоторые такие станции установлены на действующих АЗС в качестве их дополнительной опции.

Стоит отметить, что в американском стандарте нормативные расстояния от водородных устройств и систем определяются в зависимости не от назначения здания, а от конструктивных особенностей как самой системы или устройства, так и здания, к которому этот склад примыкает.

Поскольку использование водорода в качестве энергоносителя в быту и на транспорте, как правило, связано с ограниченностью производственных или жилых площадей, земельных участков, численности персонала, безопасность предназначенного для этого оборудования должна обеспечиваться, прежде всего, его конструкцией, минимально зависеть от знаний и навыков потребителя, требующих специального образования или обучения, и не предусматривать прохождения разрешительных процедур в надзорных органах. Если эти условия не будут обеспечены, вряд ли можно будет ожидать заметного распространения малой водородной энергетики в обозримом будущем. Если же они будут обеспечены за счет существенного повышения рисков выше их приемлемого уровня, первая же серьезная авария вообще прервет ее развитие на многие годы.

Установка на обеспечение как приемлемого уровня безопасности, так и конкурентоспособности водородных технологий в России потребовала от творческого коллектива специалистов, взявшегося за разработку проекта технического регламента, скрупулезной оценки видов опасности, факторов риска и способов его снижения при работе с водородом. В результате были сформулированы минимально необходимые обязательные требования, дополнительные по отношению к обязательным для всех устройств и систем требованиям пожарной безопасности, безопасной эксплуатации и утилизации машин и оборудования, безопасной эксплуатации зданий, строений, сооружений и прилегающих к ним территорий. Эти требования распространяются на все стадии жизненного цикла водородных устройств и систем: доэксплуатационные (проектирование, строительство, конструирование, изготовление, хранение, перевоз-

ку, монтаж, наладку), стадию эксплуатации и после-эксплуатационные (вывод из эксплуатации и утилизацию), но не на все водородные устройства и системы, а лишь на такие, проектное количество водорода в которых превышает 0,5 кг (что соответствует одному стандартному сорокалитровому баллону с внутренним давлением 15 мПа).

После предусмотренного федеральным законом «О техническом регулировании» публичного обсуждения проекта [5] в ноябре 2007 г. он был внесен в Государственную Думу председателями двух думских комитетов, в сфере ведения которых находились промышленность и энергетика, и одним из авторов этой статьи. В настоящее время законопроект готовится Комитетом по промышленности Государственной Думы к вынесению на пленарное заседание Государственной Думы в первом чтении.

Основные виды опасности

При всем многообразии видов опасности при работе с водородом наиболее опасно его неконтролируемое воспламенение, для чего необходимо одновременное присутствие водорода, окислителя (например, воздуха) и источника воспламенения. В роли последнего может оказаться ряд обычных для производства и быта процессов – открытый огонь, нагревание поверхностей, трение, электростатические разряды, в том числе весьма слабые, даже не воспринимаемые органами чувств человека, и т.д. Смеси водорода и окислителей горючи в широком диапазоне концентраций (от 4 до 75 объемных процентов в воздухе), температур и давлений и особенно легко воспламеняемы смеси стехиометрического состава (около 30%), что определяет их повышенную опасность в замкнутом пространстве.

Горение водорода в замкнутом пространстве в большинстве случаев приводит к дефлаграции – взрывному режиму, характеризующемуся турбулентным распространением пламени с высокой скоростью, меньшей скорости звука в не охваченной горением среде, и существенным ростом давления после сгорания по сравнению с начальным для стехиометрической смеси.

При определенных условиях дефлаграция переходит в наиболее опасный взрывной режим – детонацию, когда ударный фронт, скорость распространения которого превышает скорость звука в не охваченной горением среде, ведет за собой зону самовоспламенения и последующего горения, а давление может увеличиться в несколько раз. Поражающее действие газового взрыва определяется амплитудой взрывной волны (которая в основном зависит от скорости взрывного превращения) и ее импульсом (который зависит от уровня энергии взрыва). Следует здесь отметить, что по показателю давления взрыва (амплитуде волны) водород намного превосходит другие горючие газы, что делает его более опасным [6].

Для металлических материалов, особенно для ферритных сталей в напряженном состоянии, соприкосновение с водородом опасно снижением прочностных свойств вследствие охрупчивания, а также водородной коррозией, которой подвержены, прежде всего, низколегированные стали при высоких температурах, что может приводить к разрушению резервуаров и иного оборудования [7]. Многие вещества при охлаждении до температур жидкого водорода сжимаются и уменьшают свою пластичность, что может стать причиной разрушения устройств, не рассчитанных на такое изменение свойств конструкционных материалов.

Важным следствием чрезвычайно низкой температуры кипения жидкого водорода (20,3 К) является то, что при взаимодействии с ним все газы, кроме гелия, конденсируются и отвердевают, становясь потенциальным источником опасности блокирования клапанов и закупорки труб. Конденсация других газов влечет снижение внутреннего давления в полости и вовлечение в нее газов из других полостей, что чревато вытеснением жидкого водорода большой массой скопившихся чужеродных веществ. Кроме того, если такую систему станут разогревать, например, для технического обслуживания, замороженные вещества вернутся в газообразное состояние, что может вызвать резкий подъем давления и образование гремучей смеси.

Газообразный водород можно сжимать до очень высоких давлений, однако выброс аккумулированной при сжатии энергии порождает взрывную волну. Аналогичными последствиями чревато быстрое «размораживание» (фазовый переход) жидкого водорода в замкнутом пространстве (резервуаре или трубопроводе).

Для организма человека сам по себе водород в обычном состоянии не опасен, однако при высоких концентрациях в помещении он, как и природный газ метан, вызывает удушье вследствие вытеснения воздуха. В жидком состоянии водород опасен человеку обморожением, что также не отличает его от других сжиженных газов.

Горение водорода, в силу его специфических свойств, при дневном или искусственном свете практически невидимо для человека, поскольку основная часть излучения находится в ультрафиолетовой части спектра, и потому может привести к ожогам наподобие солнечных. Тепло же от пожара вследствие низкой эмиссионной способности пламени не ощущается до момента непосредственного контакта с газами из области горения. Учитывая температуру горения стехиометрической смеси водорода и воздуха (2323 К), такое коварство водородного пламени делает человека весьма уязвимым и для термических ожогов.

Основные способы обеспечения безопасности

Хотя риски аварий и иного причинения вреда при работе с водородом обусловлены его физическими

свойствами, реализация этих рисков вне природных катаклизмов всегда может быть объяснена человеческими ошибками. Согласно данным исследования причин 96 происшествий при использовании водорода, приведенным в Техническом отчете Технического комитета № 197 «Водородные технологии» Международной организации по стандартизации (ИСО) «Основные требования безопасности систем с использованием водорода» [8], примерно половина этих ошибок совершалась на доэксплуатационных стадиях жизненного цикла водородных устройств и систем при их проектировании, строительстве, конструировании, изготовлении, монтаже, наладке, а другая половина – в процессе их эксплуатации при его планировании, организации, контроле, подготовке персонала и непосредственном исполнении им своих обязанностей. Не существует панацеи от всего многообразия человеческих ошибок, но они, как и их последствия, могут и должны минимизироваться путем анализа и наиболее полной реализации основных условий безопасности, обеспечивающих снижение риска аварии и смягчение ее последствий.

Можно выделить три группы таких условий. **Первая** – это минимизация необходимых для достижения функциональных показателей системы энергетического потенциала¹ и человеческого участия в ее функционировании как главного объективного и главного субъективного факторов риска. Иначе говоря, чем меньше водорода, окислителей, технологического и иного оборудования, людей присутствует в системе и участвует в технологическом процессе и чем меньше непосредственное вмешательство людей в этот процесс, тем меньше риск аварии и легче ее последствия.

Эти условия должны реализовываться на доэксплуатационных стадиях жизненного цикла водородных устройств и систем путем выбора соответствующих проектных и конструкторских решений, обеспечивающих минимизацию энергетического потенциала и максимальную автоматизацию технологического процесса, включая управление им, в том числе автоматизацию действий по предотвращению и ликвидации аварийных ситуаций, локализации аварий.

Вторая группа условий предусматривает минимизацию воздействий основных поражающих факторов возможных аварий: пламени; взрывной волны, которая может приводить как к прямому поражению, так и к удару об элементы конструкций; осколков разрушенного оборудования, высвобожденных запасов различных производственных материалов и веществ и продуктов их взаимодействия, разрушения

или обрушения зданий [8]. Это достигается прежде всего за счет изолирования людей и материальных объектов от таких воздействий – пространственного (удаление от источника опасности), физического (преграды) и физиологического (индивидуальные средства защиты). Необходимо также ограничивать доступ в зону возможного поражения лиц, не участвующих непосредственно в технологическом процессе, обеспечить наличие, исправность и доступность предупреждающих сигналов (прежде всего от детекторов утечки водорода и датчиков давления), сигналов пожарной тревоги, эффективных средств пожаротушения, маршрутов эвакуации.

Что касается пространственного удаления, то здесь важно не только расстояние, но и направление расположения относительно источника опасности. Так, совершенно недопустимо расположение над водородным устройством или системой каких-либо иных объектов. Однако таких простых правил, диктуемых свойствами горючих газов, увы, мало. В целом же нормирование минимальных горизонтальных расстояний от опасных объектов и между ними, удаленности, форм, размеров и материалов защитных преград представляет очень сложную задачу.

Расчетные методы ее решения ограничены сложностью реальных диспозиций и конфигураций объектов, их упругих, прочностных и тепловых характеристик по сравнению с теми идеальными объектами, для которых удастся построить адекватные системы уравнений. Имеющиеся же эмпирические оценки границ поражения при разных условиях получены, в основном, в опытах с взрывчатыми веществами, взрывные характеристики которых существенно отличаются от газовых взрывов, и потому прямой перенос таких оценок на водород через тротильный эквивалент невозможен либо требует существенных корректировок.

Что не вызывает сомнений, так это прямая зависимость поражающего воздействия газового взрыва от количества вовлеченной во взрывной процесс газовой смеси. Этот факт позволяет дифференцировать требования к расстояниям и защитным преградам в зависимости от проектного количества водорода в системе. Другие важные факторы пространственных требований – фазовое состояние водорода, его давление, температура, присутствие и количества других горючих веществ и окислителей, возможные траектории облака горючей смеси до ее воспламенения позволяют предвидеть наиболее вероятный вид аварии, а значит, и качественный характер ее последствий. Количественные же нормативы минимальных расстояний и параметров защитных сооружений на практике устанавливаются, как правило, путем выбора наибольших значений из всех, имеющих хоть какое-то обоснование.

Между тем, существует немало способов уменьшения минимальных безопасных расстояний за счет рациональных проектных решений, учитывающих закономерности процессов дефлаграции и детонации

¹Уместно напомнить здесь определение промышленной аварии, данное 20 лет назад академиком В.А. Легасовым и его соавторами: «Авария промышленного предприятия – процесс разрушительного высвобождения его энергозапаса, при котором сырье, промежуточные продукты, продукция предприятия и отходы производства, установленное на промышленной площадке оборудование, вовлекаясь в аварийный процесс, создают поражающие факторы для населения, окружающей среды, самого предприятия и соседних промышленных объектов» [9].

и возможности современных конструкционных материалов для создания высокоэффективных огнепреградителей и детонационных ловушек.

Рассмотренные выше условия очень важны для уменьшения рисков аварии и ее последствий (первое условие) или только ее последствий (второе). Однако даже самое скрупулезное их соблюдение не уберезет от аварии, если в какой-то части системы или устройства водород смешивается с окислителем в пропорциях, границы которых, как отмечалось выше, очень широки, и тут же окажется источник воспламенения, каковых (это тоже уже отмечалось) в производственном процессе предостаточно. Следовательно, **третья**, а по значимости – первая группа условий (можно определить их как необходимые на фоне двух рассмотренных выше групп достаточных условий) – максимальная изоляция водорода от окислителей и потенциальных источников воспламенения.

Именно на это должны быть нацелены основные меры безопасности, которые необходимо специально планировать, осуществлять и контролировать на всех стадиях жизненного цикла водородных устройств и систем: **при их проектировании, строительстве, конструировании, изготовлении, хранении, перевозке, монтаже, наладке, эксплуатации, а также при выводе их из эксплуатации и утилизации.**

Общие требования по безопасности

Прежде всего, это **исключение опасного соседства** устройств и систем, предназначенных для производства, хранения, транспортировки и использования водорода, с местами потенциального присутствия окисляющих и легко воспламеняющихся веществ, искроопасного оборудования. Это также ограничение максимальной плотности размещения водородных устройств и систем и избегание, насколько это возможно, их расположения в закрытых помещениях.

Так, согласно упоминавшимся выше Правилам Госгортехнадзора, производство электролитического водорода с взрывоопасными условиями следует осуществлять только в одноэтажных зданиях, при необходимости – с расположенными во втором ярусе площадками для размещения и обслуживания оборудования. Размещение над помещениями, где обращается водород, или под ними каких-либо производств и любых других объектов, не связанных с данным производством, не допускается. Здания и сооружения, связанные с производством водорода (водородно-кислородные станции, склады, газгольдеры, ресиверы для водорода и пр.), должны размещаться на промплощадке вне этого здания, причем не рекомендуется выносить их к оградкам предприятия, выходящим на улицы, проезды, скверы.

В то же время, например, стандарт Национальной ассоциации пожарной защиты США не вводит ограничений по этажности зданий или ограничений, связанных с размещением таких устройств на крыше. Вопросы безопасности обеспечиваются современ-

ными техническими и организационными средствами. Так, водородная система менее 3500 нормальных кубических футов (99 м^3), расположенная внутри здания и доступная для обслуживающего персонала, должна находиться в хорошо проветриваемой зоне, на расстоянии не менее 6 м от любых окислительных газов, легко возгорающихся или высоко горючих материалов, таких как бумага или мягкая стружка, не менее 7,6 м от открытого огня, электрического оборудования и других источников огня, не менее 15 м от впускного устройства вентиляции, оборудования для кондиционирования или воздушного компрессора, от других мест хранения воспламеняющихся газов. Она также должна быть защищена от повреждений и иного ущерба вследствие падений предметов или иных последствий технологического процесса в этой зоне. Можно устанавливать в том же самом помещении и более одной такой системы при условии, что системы разделяет расстояние не менее 15 м или стена с минимальным уровнем огнестойкости в 2 часа.

При конструировании, изготовлении, хранении, перевозке, монтаже, наладке водородных устройств и систем главное условие безопасности – это обеспечение герметичности для исключения возможности утечки водорода или попадания окислителей в их внутренние полости, где присутствует водород. Если же технология предусматривает смешение водорода с окисляющими веществами внутри водородного устройства или системы, для предотвращения проникновения окисляющих веществ извне внутреннее давление должно превышать давление окружающей среды. Необходимо также предотвращать накопление смесей водорода и окислителя в замкнутых пространствах (под карнизами крыш, в помещениях или отсеках для оборудования или под колпаками или кожухами оборудования), не допускать какого-либо засорения водородных устройств и систем.

Риски нарушения герметичности могут быть связаны с неправильным выбором конструкционных материалов, избыточным числом соединений и их недостаточно надежным уплотнением, отсутствием или недостаточностью компенсаторов тепловых деформаций, неконтролируемым внутренним давлением.

В процессе эксплуатации необходимы, прежде всего:

- контроль и профилактика безопасности и надежности оборудования, в том числе контрольного и аварийного, своевременная замена оборудования, выработавшего срок службы (по возможности – более безопасным и надежным);

- обучение персонала методам диагностики опасностей и необходимым действиям по предотвращению и ликвидации аварийных ситуаций;

- систематический контроль за соблюдением персоналом правил техники безопасности, сопровождающийся эффективными санкциями при их нарушении и стимулами при соблюдении.

Любое предлагаемое изменение какого-либо технологического фактора в процессе эксплуатации должно прежде всего анализироваться на предмет изменения рисков в результате его реализации и безусловно отклоняться, если это приведет к неприемлемому уровню рисков.

Для повышения безопасности водородной системы важно учитывать при проектировании и строительстве и значительные **риски, связанные с трубопроводами и арматурой**. По возможности прокладка трубопроводов водорода внутри помещений должна осуществляться открыто. При необходимости их прокладки в каналах совместно с другими трубопроводами (которая требует обоснования в проектной документации) должны соблюдаться следующие условия:

- перекрытия каналов должны исключать возможность скопления водорода под ними;
- в канале на трубопроводе водорода не должна устанавливаться какая-либо арматура;
- трубопровод водорода должен размещаться выше других трубопроводов;
- трубопровод водорода в пределах канала должен монтироваться на сварке;
- глубина канала не должна превышать одного метра;
- каналы, предназначенные исключительно или в том числе для прокладки трубопроводов водорода, не должны пересекаться с другими каналами.

На выходе трубопроводов водорода из зданий, где расположены водородные устройства и системы, или от водородных устройств и систем, расположенных на открытой площадке, а также на их входе в такие здания или к таким устройствам и системам, расположенным открыто, должны устанавливаться (вне зданий) запорная арматура и устройства, исключающие возможность обратного пропуск водорода (отсекающая арматура).

Из соображений безопасности серьезные ограничения устанавливаются на типы соединений на трубопроводах водорода (не допускается использование фланцевых соединений с плоскими фланцами), места прокладки транзитных трубопроводов водорода по наружным стенам производственных зданий (допускается только вдоль участков глухих стен вспомогательных помещений невзрывоопасных категорий), его диаметра и давления водорода. Вся автоматическая запорная и отсекающая арматура должна иметь сигнализацию положения (открыто/закрыто) с выводом ее на пульт управления.

Утечка или пролитие водорода в невентилируемом замкнутом пространстве может легко привести к образованию воспламеняемых газообразных смесей. Соответственно, такое пространство должно быть оборудовано детекторами для обнаружения наличия водорода и предотвращения накопления воспламеняемой смеси, а если в нем находится оборудование для использования или хранения водорода, всегда

необходимо устанавливать активную или пассивную **систему вентиляции**.

Для различных продувочных операций (откачка и заполнение, наддув и удаление, прямоток) нужен блок с инертным газом, защищенным от смешивания с водородом. Водородные устройства следует продувать инертным газом до и после присутствия в нем водорода, выдувая из него воздух перед подачей водорода, а водород – перед открытием системы и впуском в нее воздуха. При использовании в качестве продувочного газа двуокиси углерода следует проявлять осторожность в связи с потенциальной сложностью удаления двуокиси углерода из нижних точек системы, где может происходить накопление этого газа.

Обычной практикой утилизации водорода является его выброс в атмосферу через вентиляционное отверстие (при этом сжигания водорода не происходит) или его сжигание в факельной системе (при этом водород воспламеняется в точке выброса и сгорает). Точка выброса вентиляционной системы должна находиться над самой высокой точкой непосредственного окружения и вдалеке от линий электропередачи и других потенциальных источников воспламенения. Для утилизации больших объемов газообразного водорода применяется факельная система. Конкретный характер местных условий и скорость вентиляции водорода являются двумя факторами, от которых зависит выбор системы утилизации. При скорости вентиляции выше 0,23 кг/с или при количествах водорода, превышающих безопасную утилизацию через вентиляционную систему, предпочтение обычно отдают факельной системе.

Следует предотвращать образование противотока воздуха в вентиляционной системе. Ни в коем случае нельзя производить распыление воды таким образом, чтобы она могла попадать в вентиляционную систему при использовании жидкого водорода. Вода, замерзая, может закупорить вентиляционную систему.

Вентиляционная система должна быть оборудована устройствами для тушения пожаров в ней, а также для продувки находящегося в ней воздуха или водорода. Удаляемый из вентиляционной системы водород нередко воспламеняется молнией или другим источником, создавая пламя, которое сложно увидеть. Размеры пламени зависят от скорости выпуска водорода.

Следует определить тепловое излучение пламени факельной системы и установить соответствующее безопасное расстояние для защиты персонала.

Вентиляционные отверстия должны располагаться на крыше таким образом, чтобы водород не попал в воздухозаборники здания.

Системы защиты

Важнейшим условием обеспечения безопасности при работе с водородом являются надежные и эффективные **защитные системы**. К ним относятся

системы аварийного останова, предохранительные устройства, устройства утилизации водорода, средства обнаружения, системы сигнализации, контрольно-измерительные приборы, средства пожаротушения. Ниже рассматриваются основные требования к защитным системам оборудования, предназначенного для производства, хранения, транспортировки и использования водорода.

Когда предотвратить выход технологических параметров за предельные значения не удастся, в том числе в случае прекращения подачи энергоносителей и (или) материальных потоков, необходимо остановить вышедший из-под контроля технологический процесс. Для этого водородные устройства и системы должны оснащаться **системами аварийного останова**, включающимися автоматически и обеспечивающими весь цикл безаварийной остановки – от перекрытия отсекающей (запорной) арматуры до освобождения отсекаемого участка от обрабатываемых веществ. При этом следует предусматривать дублирование системы аварийного останова системой ручного дистанционного управления отсекающей (запорной) арматурой с пульта управления.

Объемная доля водорода в местах его возможного выделения, при которой срабатывает аварийная система останова, не должна превышать 1 процента.

Предохранительные устройства предназначены для предотвращения неконтролируемого выхода параметров технологического процесса за предельные значения и для восстановления нормы. Конструкция, исполнение и размещение (места установки) предохранительных устройств должны исключать возможность выброса водорода в помещение, а также искрообразования при срабатывании предохранительных разрывных мембран. При этом должна быть предусмотрена система аварийного сброса водорода с предохранительных клапанов и других противаварийных устройств. Для повышения ее надежности установка запорных и каких-либо иных устройств на системах аварийного сброса от предохранительных устройств не допускается.

Точка выброса водорода из систем аварийного сброса и сброса продувочных газов должна быть выведена на высоту не менее чем на 1 метр выше самой высокой точки здания или, в случае открытой установки, – самой высокой точки объектов, расположенных в радиусе 10 метров от системы аварийного сброса, но не менее 6 метров от уровня земли.

Расстояние между точками сброса водорода и окисляющих веществ должно быть не менее 10 метров. Допускается уменьшение этого расстояния до 6 метров при условии, что выброс водорода производится более чем на 0,5 метра выше, чем выбросы окисляющих веществ.

Для исключения образования взрывоопасных смесей в системе аварийного сброса при сбросе водорода в атмосферу должна быть предусмотрена непрерывная подача в нее инертного газа или водяного пара. При периодичности технологических процес-

сов допускается подача инертного газа или водяного пара в систему аварийного сброса с такой же периодичностью.

При необходимости утилизации водорода, содержащегося в отходящих газах, водородные устройства и системы должны оборудоваться **устройствами утилизации**, конструкция которых исключала бы возможность сквозного прохода через них неутраченного водорода. В случае отказа устройства утилизации водорода конструкция водородных устройств и систем, оборудованных этим устройством, должна обеспечивать их автоматическую безаварийную остановку, прекращение подачи водорода и продувку внутреннего пространства инертным газом.

Зоны возможного выделения водорода в производственных помещениях должны быть оборудованы **средствами обнаружения** – детекторами водорода, детекторами водородного горения и системой сигнализации с подачей звукового и светового сигналов.

Тип, количество и места установки детекторов водородного горения выбираются с учетом охватываемой ими области, чувствительности к посторонним источникам (солнечный свет, молния, сварка, иные источники света), времени реагирования и чувствительности к надлежащему спектру излучения, а также совместимости с автоматической системой контроля и управления.

Тип, количество и места установки детекторов обнаружения водорода выбираются с учетом их точности, надежности, восстанавливаемости (ремонтпригодности), калибровки, пределов обнаружения, времени реакции, области охвата и совместимости с автоматической системой контроля и управления.

Показания **контрольно-измерительных приборов** защитных систем водородного оборудования, требующие постоянного контроля, должны дублироваться на пульте управления. Измерительная аппаратура, а также программы и компьютеры, используемые в защитной системе, должны быть независимыми от такого же оборудования, используемого в технологическом процессе, и иметь достаточный резерв надежности.

Газоанализаторы независимо от вида исполнения могут размещаться как в отдельном помещении, так и непосредственно в помещениях, где обращается водород. При необходимости устройства отдельного помещения для газоанализаторов вентиляция такого помещения должна исключать возможность образования взрывоопасной концентрации водорода в течение одного часа при полном разрыве газоподводящей трубки одного газоанализатора независимо от их числа в помещении при наличии ограничителей расхода и давления водорода. Ограничители расхода и давления на устройствах для отбора проб должны размещаться в безопасном месте вне помещения газоанализаторов. После анализа водород должен возвращаться в водородное устройство или систему либо удаляться в атмосферу через систему сброса.

Для подачи сигнала тревоги в случае потенциально опасной ситуации необходимы **сигнальные устройства**, сигнал которых давал бы достаточный запас времени для безопасного отключения водородного устройства или системы.

Сигнальные устройства должны подавать звуковой или зрительный сигнал, или оба сигнала вместе, как минимум, в случаях пожара, выброса пламени, утечки водорода, обнаружения водорода в приемном устройстве вентиляционной системы здания, разгерметизации, отклонения давления от нормы, опасного положения клапана, опасной скорости работы насоса, опасного перепада давления на фильтре. Включение системы аварийного останова также должно сопровождаться срабатыванием автоматической сигнализации о включении системы аварийного останова с подачей звукового и светового сигналов.

Объемная доля водорода в зонах его возможного выделения, при которой срабатывает система сигнализации с подачей звукового и светового сигналов, не должна превышать 0,4 процента.

Водородные устройства и системы должны быть оснащены автоматическими **средствами пожаротушения**. При проектировании систем пожаротушения водородных устройств и систем должно учитываться, что во избежание образования взрывоопасных смесей гашение пламени следует осуществлять только после прекращения утечки водорода, поскольку его горение не прекратится до изолирования источника водорода. Для защиты окружающего пространства от последствий пожара должны быть приняты дополнительные меры по недопущению распространения пламени.

Небольшие пожары могут быть потушены химическими огнетушителями, углекислотными огнетушителями, азотом или паром. Для охлаждения оборудования в области, прилегающей к горящему водороду, можно использовать воду.

Поскольку необходимым условием возгорания водородо-воздушной смеси является источник воспламенения, следует исключить, насколько это возможно, присутствие таких источников в непосредственной близости от мест возможной концентрации горючих смесей водорода и воздуха. Это в первую очередь относится к **электрооборудованию и электропроводке**, которые должны иметь подтвержденные соответствия требованиям, предъявляемым при использовании в водородной среде, то есть быть искробезопасными или размещаться в оболочке, продутой инертным газом. Дополнительной гарантией стало бы требование использования такого электрооборудования и электропроводки при температуре открытой поверхности ниже температуры воспламенения смеси водорода и воздуха.

Все водородные устройства и системы должны быть защищены от удара молнии, все контакты электрооборудования изолированы полимерным герметиком и заземлены. Переносное оборудование долж-

но быть заземлено до его подсоединения к другому оборудованию системы.

Особые требования безопасности предъявляются также к **вводу водородных устройств и систем в эксплуатацию и эксплуатационному контролю**. Так, их внутреннее пространство после монтажа должно быть очищено от органических и механических загрязнений (остатков органических и иных материалов, а также частиц нагара, ржавчины, грязи, остатков сварки и сварочного флюса). При этом чистящие материалы должны быть совместимы с материалами конструкции.

Перед пуском в эксплуатацию, а также после плановых и аварийных остановок водородные устройства и системы должны быть освобождены от воздуха продувкой инертным газом до того, как в них поступит водород, и проверены на герметичность с целью обнаружения мест возможных утечек и их устранения.

В процессе эксплуатации водородные устройства и системы должны подвергаться периодической проверке на герметичность с целью обнаружения мест возможных утечек и их устранения.

Перед проведением ремонтных, профилактических и других работ, не связанных с эксплуатацией и выводением из эксплуатации, водородные устройства и системы должны быть остановлены и освобождены от водорода продувкой инертным газом. Наличие водорода в выпускаемом продувочном газе перед окончанием продувки не должно превышать 1 процента (согласно рекомендациям Технического отчета ТК 197 ИСО – 2 процента [8]).

После плановых или аварийных остановок трубопроводы водорода должны подвергаться пневматическим испытаниям на герметичность инертным газом продолжительностью один час, падение давления при этом не должно превышать 0,1 процента.

Персонал, выполняющий работы в местах возможных утечек водорода, должен быть обеспечен портативными устройствами обнаружения водорода и водородного горения, одеждой и средствами индивидуальной защиты из материалов, не способных накапливать статическое электричество.

Стоит отметить и некоторые иные конкретные рекомендации по **средствам индивидуальной защиты (СИЗ)** персонала, обслуживающего водородные устройства и системы, которые предлагаются в упомянутом выше Техническом отчете ТК 197 ИСО [8]:

- необходимо носить средства для защиты зрения (например, защитную маску, закрывающую все лицо) при монтаже и демонтаже труб или узлов;

- при контакте с жидким водородом или холодным газообразным водородом необходимо носить надлежащим образом изолированные перчатки. Эти перчатки должны быть свободными, без больших манжет и легко сниматься;

- следует носить длинные брюки, предпочтительно без отворотов, закрывающие верх ботинок или рабочих туфель. Нельзя носить открытую обувь или обувь с отверстиями;

– одежда должна быть сделана из обычного хлопка или огнестойкого хлопка. Следует избегать ношения одежды из нейлона или других синтетических материалов, шелка или шерсти, поскольку эти материалы способны создавать электростатические заряды, которые могут воспламенять горючие смеси. Синтетические материалы одежды могут плавиться и приклеиваться к коже, увеличивая повреждения от ожогов. При попадании капель или брызг водорода на одежду ее следует снять до полного удаления из нее газообразного водорода;

– не следует носить перчатки с крагами, обтягивающую одежду или одежду, которая улавливает или удерживает воду на теле;

– необходимо заземляться прежде чем прикаснуться к водородному устройству или пользоваться инструментом.

Часто рекомендуется использование искрозащитных инструментов; однако для воспламенения горючей смеси водорода и воздуха требуется настолько малая энергия, что даже искрозащитные инструменты могут вызвать воспламенение. Таким образом, все инструменты следует использовать с осторожностью для предотвращения соскальзывания, скользящих ударов и падения, поскольку все эти действия могут вызвать искры.

Специальные требования к безопасности отдельных видов водородных устройств и систем

Наряду с общими требованиями в мировой и российской практике предъявляются и **специальные требования к безопасности отдельных видов водородных устройств и систем**. Ниже последовательно описаны основные специальные требования к наиболее массовым видам оборудования, предназначенного для производства товарного водорода (электролизеры и компрессоры), его хранения и транспортировки (средства хранения и транспортировки жидкого водорода, газгольдеры, баллоны высокого давления, бортовые системы хранения) и его использования как энергоносителя (электрохимические генераторы).

Так, в устройствах и системах, предназначенных для **электролизного производства водорода**, должны приниматься специальные меры по предотвращению проскока водорода и кислорода в растворенном виде вместе с канализационными стоками. Для этого при устройстве их выпусков устанавливаются гидравлические затворы или другие средства предотвращения проскока растворенного водорода и кислорода. Для обеспечения надежности гидрозатворов к ним предъявляются требования по минимальной высоте слоя жидкости, а также по удобству конструкции места расположения для быстрой очистки. Каждый выпуск канализационных стоков на электролизных устройствах и системах должен оснащаться вытяжным вентиляционным стояком, установленным в отапливаемой части здания и выведенным выше конька крыши здания на высоту не менее

1 метра. Машинные отделения холодильных установок (систем осушки водорода методом охлаждения) должны располагаться в отдельном от электролизного отделения помещении.

Если производимый водород не предназначен для незамедлительного использования непосредственно в месте его производства, а требует хранения и (или) транспортировки к месту использования, его необходимо компримировать или оживить. Важнейшим элементом **безопасности** устройств и систем, предназначенных для **компримирования водорода**, является возможность его отсечения как на линии впуска (от трубопровода низкого давления), так и на линии выпуска (в трубопровод высокого давления).

Устройства и системы компримирования водорода на каждой ступени сжатия должны иметь предохранительные клапаны, а также приборы для контроля давления и температуры водорода и охлаждающей воды. Все конструктивные элементы, в том числе сочленения, должны быть рассчитаны на рабочие статические и динамические нагрузки от различных частей компрессора, включая нагрузки, передаваемые от опор трубопровода на фундамент. Передача крутящего момента от двигателя к водородным компрессорам должна осуществляться через муфту, редуктор, фланцевое соединение или через клиноременное устройство при условии использования ремней, выполненных из токопроводящих материалов или смазанных токопроводящей смазкой. Применение здесь плоскоремennых передач не допускается.

Крупные системы компримирования водорода должны быть также оснащены устройствами подачи азота на продувку такой системы от газгольдера или ресивера до узла стыков.

В силу специфических опасных свойств **жидкого водорода** особые требования безопасности предъявляются к устройствам и системам, предназначенным для его хранения и транспортировки.

Так, при наземном расположении стационарных резервуаров для хранения жидкого водорода их фундаменты и (или) опоры должны быть выполнены из негорюемых материалов с высоким пределом огнестойкости. Необходимо также ограничение площади возможного аварийного пролива путем создания вокруг каждого резервуара обвалования или приямка либо установки резервуара в поддонах из материала, непроницаемого для жидкого водорода и совместимого с ним. Обвалование должно быть выполнено в виде сплошной негорюемой стены или земляного вала и рассчитано на гидростатическое давление возможного пролива. Объем обвалования или приямка должен составлять не менее четверти от геометрического объема защищаемого резервуара. Для обеспечения отвода атмосферных осадков и (или) грунтовых вод из обвалования или приямка должна быть предусмотрена дренажная система.

Наземные стационарные резервуары для хранения жидкого водорода, расположенные на открытой территории, должны окрашиваться в светлый цвет и

оборудоваться теньевыми кожухами либо размещаться под навесами из несгораемых материалов с целью предотвращения нагрева их солнечными лучами. Нельзя допускать образования застойных зон под конструктивными элементами теньевых кожухов и навесов.

Резервуары для хранения жидкого водорода должны быть оборудованы устройствами для их планового и (или) аварийного опорожнения. Все емкости, предназначенные для хранения и транспортировки жидкого водорода, должны оснащаться двумя предохранительными устройствами для внутреннего резервуара и разрывной мембраной для наружного кожуха. Каждое предохранительное устройство для внутреннего резервуара должно включать предохранительный клапан. Пропускная способность каждого из этих устройств должна быть рассчитана из условия пропуска паров, образовавшихся в результате полной разгерметизации изоляционной полости или в результате отката находящейся в открытом состоянии запорной арматуры на змеевике испарителя, служащего для подъема давления, а также полного расхода газа наддува. Жидководородные устройства и системы также должны быть оборудованы приборами измерения уровня жидкости, давления во внутреннем резервуаре и в изоляционной полости, а также датчиком падения давления во внутреннем резервуаре сверх допустимого. Конструкция таких устройств и систем должна обеспечивать возможность отбора проб из нижней и из верхней частей внутреннего резервуара.

Конструкция транспортных средств, предназначенных для транспортировки жидкого водорода, должна обеспечивать транспортировку с установленной скоростью, стойкость к продольным и поперечным нагрузкам и вибрационным воздействиям, безопасность сброса газа во время движения, возможность их надежного заземления.

Приборы замера уровня жидкости и давления во внутреннем резервуаре устройств и систем, предназначенных для транспортировки жидкого водорода автомобильным транспортом, должны быть дублированы и выведены в кабину водителя.

На площадках наполнения должны быть предусмотрены меры, исключающие приближение автотранспорта к устройствам, предназначенным для транспортировки жидкого водорода, во время проведения сливо-наливных операций на расстояние менее двадцати метров.

Крепежные детали и прокладки фланцевых соединений технологических трубопроводов жидкого водорода должны располагаться в зонах, отделенных тепловыми мостами от холодных участков, непосредственно контактирующих с жидким водородом.

Технологические трубопроводы жидкого водорода должны иметь минимальное количество поворотов трассы и укладываться с уклоном в сторону резервуаров хранилища жидкого водорода или дренажных систем, обеспечивающим возможность

полного освобождения технологических трубопроводов жидкого водорода самотеком. На кожухах таких трубопроводов должны быть предусмотрены устройства для создания вакуума, приборы для измерения вакуума, а также предохранительные устройства (предохранительные клапаны, разрывные мембраны) для защиты кожуха от разрыва при аварийном повышении давления в теплоизолирующей полости.

Конструкция арматуры, установленной на жидководородных устройствах и системах, должна обеспечивать надежную теплоизоляцию от рабочей среды механизмов привода, концевых выключателей, прокладочных соединений. Промерзание указанных узлов арматуры за счет охлаждения жидким водородом не допускается. В качестве рабочей среды пневматических исполнительных механизмов встроенной запорной и отсекающей арматуры на жидководородных устройствах и системах должен использоваться гелий.

Одним из распространенных средств хранения водорода в газообразном состоянии являются **газгольдеры**. Газгольдеры для хранения водорода и водородосодержащих газов должны быть оборудованы системами контроля постоянного поступления воды и слива через переливные карманы, дистанционными указателями уровня наполнения газгольдеров водой, автоматической сигнализацией с подачей светового и звукового сигналов крайних верхнего и нижнего положений колокола, системой сброса продувочных газов на центральном люке колокола, системой блокировки компрессора в нижнем положении колокола. Ввод газа в газгольдер и отвод его из газгольдера должны осуществляться через отапливаемое помещение – камеру газового ввода/вывода. При этом газовые стояки должны выступать над уровнем воды в резервуаре настолько, чтобы обезопасить их от возможного попадания воды в стояк.

Для отключения газгольдера на ремонт и отвода конденсата от подводящих и отводящих трубопроводов, расположенных в камере газового ввода/вывода, должны быть установлены гидравлические затворы. Для заливки гидравлических затворов при ремонтах и в аварийных случаях в камеру газового ввода/вывода должна быть подведена вода. Управление арматурой гидравлических затворов и других устройств, расположенных в камере газового ввода/вывода, должно быть выведено на площадку над приемком камеры. Слив воды из резервуара газгольдера при проведении ремонтных работ и очистке должен осуществляться только через штуцер, установленный в днище резервуара. Перелив воды из резервуара должен производиться через верхний переливной карман. Сливное отверстие должно располагаться в нижней части кармана. Должны также предусматриваться меры по недопущению замерзания воды в газгольдере. Полный выпуск водорода из газгольдера, кроме случаев остановки на ремонт, не допускается.

Наиболее распространенное в настоящее время средство хранения газообразного водорода – баллоны высокого давления, в которых водород сжимается до 15-20 мПа (в перспективе – до 70 мПа).

По действующим нормам складские помещения для хранения наполненных баллонов с водородом разделяются на отсеки (рассчитанные на хранение не более пятисот баллонов), несущими или самонесущими защитными стенами высотой не менее 2,5 метра. Отсеки, в свою очередь, разделяются на специальные кабины (в каждой из которых может разместиться не более 36 сорокалитровых баллонов с рабочим давлением не выше 15 мПа), разделенные между собой ограждением высотой не менее 2,2 метра. Из каждого отсека предусматривается непосредственный выход наружу на погрузочную площадку.

Складское хранение баллонов с газообразными окисляющими веществами и с водородом в смежных помещениях допустимо, только если они изолированы друг от друга глухой противопожарной газонепроницаемой стеной. Помещения для хранения баллонов с водородом и баллонов с окисляющими веществами должны иметь самостоятельные выходы. В зданиях складов хранения баллонов с водородом не допускается размещение вспомогательных помещений.

В помещении наполнения баллонов у водородной рампы при поштучном наполнении или наполнении в контейнеры по восемь баллонов для размещения порожних и наполняемых водородом баллонов устраиваются специальные кабины, разделенные между собой железобетонной стеной высотой не менее 2,2 метра, в каждой из которых может разместиться не более 16 сорокалитровых баллонов.

При горизонтальном расположении баллонов и размещении их внутри помещения баллоны отделяются от рабочей зоны стальными щитами, в которых предусматриваются отверстия для прохождения вентиля баллонов с ограждением кромок отверстий не искрящими эластичными материалами. Пульт управления вентилями, выполненный из стальных листов, размещается в помещении компрессорной либо на расстоянии не менее полутора метров от наполняемых баллонов за железобетонной стеной высотой не менее 2,2 метра.

На каждой ветви наполнительной рампы устанавливается контактный манометр, сигнализирующий при повышении давления в рампе выше допустимого, и предохранительный клапан. При использовании для компримирования водорода компрессорных установок, имеющих автоматическую защиту компрессора от превышения давления на последней ступени, необходимость установки предохранительного клапана и контактного манометра на наполнительной рампе требует специального обоснования, как и установка предохранительного клапана на разрядной рампе.

При снабжении потребителей от баллонных рамп опорожнения (разрядки) емкость последних не должна превышать 10 сорокалитровых баллонов. При на-

полнении контейнеров вместимостью 36 баллонов должна быть обустроена открытая площадка, имеющая легкий навес из негорючих материалов.

При необходимости совместного размещения у глухой наружной стены баллонов водорода и баллонов с газообразными окисляющими веществами последних должно быть не более двух и они должны размещаться в отдельных металлических шкафах на расстоянии от баллонов с водородом не менее 6 метров или менее – при устройстве между ними противопожарной перегородки высотой не менее чем на 0,7 метра выше баллона с обвязкой и с шириной выступа за баллоны не менее 0,5 метра. Допускается размещение между баллонами с водородом и баллонами с газообразным окисляющим веществом баллонов с инертными газами.

При транспортировке водородных баллонов, а также контейнеров с баллонами водорода грузоподъемными устройствами крепление баллонов за колпак не допускается. При погрузке и разгрузке баллонов не допускается их сбрасывание, соударение друг с другом и иными предметами, а также разгрузка методом захвата за баллонный вентиль. Транспортные средства для перевозки баллонов с водородом должны быть оснащены специальными приспособлениями для фиксации баллонов.

При опорожнении (разрядке) водородных баллонов остаточное давление в них должно составлять не менее 0,05 мПа. Такое же минимальное остаточное давление должны иметь баллоны, подготовленные для наполнения водородом.

Не допускается производить какой-либо ремонт арматуры баллонов с газами вне специально предназначенного для этой цели помещения.

Одним из наиболее перспективных направлений развития и коммерциализации водородных технологий является создание «водородных» автомобилей (с ДВС и гибридных с топливными элементами) с **бортовой системой хранения водорода**. Размещение такой системы не должно увеличивать габаритные размеры транспортного средства (кроме увеличения высоты за счет установки бортовой системы хранения водорода, если это не ведет к потере управляемости и устойчивости транспортного средства).

Размещение бортовой системы хранения водорода не должно затруднять доступ к агрегатам транспортных средств. Устройства бортовой системы хранения водорода должны размещаться на достаточном удалении от системы выпуска отработавших газов либо отделяться от нее теплозащитным экраном, быть доступны для проведения работ по техническому обслуживанию и контролю герметичности. Трубопровод водорода должен быть минимальным по длине, внутри пассажирского салона, багажного или грузового отсеков не иметь соединений и размещаться в вентилируемой оболочке. Вне кузова трубопроводы должны быть защищены элементами шасси или защитным устройством от ударного воздействия.

Крепление трубопроводов водорода должно исключать деформацию жестких и растягивающие нагрузки гибких трубопроводов при эксплуатации. Трубопроводы в точке крепления должны иметь защитную прокладку, исключающую контакты металлических частей между собой. Трубопроводы должны размещаться вне мест установки домкрата.

Стационарные **электрохимические генераторы** и входящие в их состав отдельные устройства, предназначенные для размещения вне помещений или на крышах зданий, должны располагаться так, чтобы не допускать попадания отходов технологического процесса внутрь помещений.

Выходные отверстия для отходов технологического процесса стационарных электрохимических генераторов, предназначенных для размещения вне помещений или на крышах зданий, мощностью свыше 50 киловатт должны располагаться не ближе 5 метров от систем отопления, вентиляции, окон, дверей, а для электрохимических генераторов мощностью 50 киловатт и менее – не ближе 3 метров. Выходные отверстия для отходов технологического процесса стационарных электрохимических генераторов не должны выходить на пешеходные пути.

В помещениях, где размещаются электрохимические генераторы, должна быть организована отдельная принудительная вентиляция. Системы отвода отходов технологического процесса в помещениях с генератором не должны иметь избыточного давления. Система вывода газообразных отходов технологического процесса должна обеспечить скорость вывода отходов не менее 0,3 кубического метра в минуту на квадратный метр поверхности пола и не менее 45 кубических метров в минуту. При использовании принудительного вывода отходов технологического процесса должна быть предусмотрена система их отвода на случай аварийной остановки. Системы продувки потенциальных источников накопления водорода и других горючих веществ должны обеспечивать их отвод за пределы помещения, газоотвод должен быть организован так, чтобы исключить попадание в газ воды и других инородных предметов. Системы отвода отходов технологического процесса и помещения, где размещен электрохимический генератор, должны быть оснащены сигнализацией взрывоопасной концентрации горючих веществ.

Спроектированные и предназначенные для сборки на рабочей площадке электрохимические генераторы должны быть оснащены автономными системами пожаротушения и пожарной сигнализации, а также системой автоматического отключения подачи топлива в систему.

Важнейшее значение для обеспечения безопасности при работе с водородом имеет **хорошо организованная целенаправленная деятельность всех участников технологического процесса по минимизации рисков аварии и последствий возможных аварийных ситуаций**. В тщательной, скрупулезной формализации такой работы надо видеть про-

явление не злостного бюрократизма, а осознания высшим руководством организации своей ответственности за жизни людей.

Именно руководители организации должны возглавить разработку комплекса внутренних нормативных документов по безопасности, обучение всех категорий персонала и воспитание работников в духе абсолютного приоритета требований этих документов и нетерпимости ко всякому уклонению или отклонению от их безусловного исполнения (что отнюдь не исключает возможности для любого работника вносить и обсуждать предложения об их пересмотре), а также контроль за соблюдением этих требований. Стоит напомнить здесь факт, о котором говорилось в начале этой главы: основная причина всех аварий при работе с водородом – так называемый человеческий фактор, то есть некомпетентность, безответственность, неорганизованность конкретных людей – важнейшая задача руководителей коллективов, работающих с водородом, без решения которой усилия по совершенствованию техники и технологии могут оказаться неэффективными.

Список литературы

1. Кириллов И.А., Коробцев С.В. Проблемы водородной безопасности. Доклад на Международной конференции «Альтернативные источники энергии для больших городов», Москва, 12-13 октября 2006 г.
2. Кузык Б. Государственно-частное партнерство в сфере возобновляемых источников энергии: проблемы и перспективы. Доклад на 11 Международном форуме «Водородные технологии для развивающегося мира», 22-23 апреля 2008 г., Москва. М., 2008. С. 26.
3. Постановление Госгортехнадзора России от 6 июня 2003 г. № 75 «Об утверждении Правил безопасности при производстве водорода методом электролиза воды».
4. NFPA 50A, Standard for Gaseous Hydrogen Systems at Consumer Sites. National Fire Protection Association, Quincy, MA, USA, 1999.
5. Вестник технического регулирования. 2007. № 8, № 11.
6. Гельфанд Б.Е., Сильников Б.В. Газовые взрывы. СПб: «Астерион», 2007.
7. Федотов В.П. Проблемы прочности и надежности элементов конструкций и механизмов, эксплуатируемых в водородосодержащих средах. Труды Международного симпозиума по водородной энергетике 1-2 ноября 2005 г. М.: Изд-во МЭИ, 2005. С. 57-60.
8. ISO/TR 15916: 2004(E) «Basic considerations for the safety of hydrogen systems».
9. Легасов В.А., Чайванов Б.Б., Черноплеков А.Н. Научные проблемы безопасности техносферы // Безопасность труда в промышленности. 1988. № 1. С. 44-51.

