ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО

ПО ТЕХНИЧЕСКОМУ РЕГУЛИРОВАНИЮ И МЕТРОЛОГИИ

НАЦИОНАЛЬНЫЙ СТАНДАРТ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ГОСТ Р 70680— 2023

Автомобильные транспортные средства на водородных топливных элементах

ТОПЛИВНЫЕ СИСТЕМЫ

Технические требования

Издание официальное

Москва
Российский институт стандартизации
2023

gost.e-ecolog.ru

Предисловие

1 РАЗРАБОТАН Федеральным государственным унитарным предприятием «Центральный ордена Трудового Красного Знамени научно-исследовательский автомобильный и автомоторный институт «НАМИ» (ФГУП «НАМИ»)

2 ВНЕСЕН Техническим комитетом по стандартизации ТК 056 «Дорожный транспорт»

3 УТВЕРЖДЕН И ВВЕДЕН В ДЕЙСТВИЕ Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 27 сентября 2023 г. № 980-ст

4 ВВЕДЕН ВПЕРВЫЕ

*Правила применения настоящего стандарта установлены в статье 26 Федерального закона от 29 июня 2015 г. № 162-ФЗ «О стандартизации в Российской Федерации». Информация об изменениях к настоящему стандарту публикуется в ежегодном (по состоянию на 1 января текущего года) информационном указателе «Национальные стандарты», а официальный текст изменений и поправок — в ежемесячном информационном указателе «Национальные стандарты». В случае пересмотра (замены) или отмены настоящего стандарта соответствующее уведомление будет опубликовано в ближайшем выпуске ежемесячного информационного указателя «Национальные стандарты». Соответствующая информация, уведомление и тексты размещаются также в информационной системе общего пользования — на официальном сайте Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии в сети Интернет (*gost.e-ecolog.ru

© Оформление. ФГБУ «Институт стандартизации», 2023

Настоящий стандарт не может быть полностью или частично воспроизведен, тиражирован и распространен в качестве официального издания без разрешения Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии

Содержание

1 Область применения 1
2 Нормативные ссылки 1
3 Термины, определения, обозначения и сокращения 2
4 Общие требования 4
5 Эксплуатационные требования к системам хранения и переработки водорода 11
Приложение А (обязательное) Руководство по совместимости материалов для работы с водородом, включая системы хранения сжатого водорода 31
Приложение Б (обязательное) Хранение сжатого водорода, квалификационные испытания 38
Приложение В (обязательное) Обоснование требований к проектированию и квалификационных требований к системам хранения сжатого водорода, определенных в 5.2 47
Приложение Г (обязательное) Руководство по проектированию компонентов для водородных систем 65
Приложение Д (обязательное) Квалификационные испытания материалов для систем хранения компримированного водорода 68
Приложение Е (обязательное) Руководство по интеграции системы подачи сжатого водорода 69
Приложение Ж (обязательное) Руководство по определению сопротивления на разрыв сосудов высокого давления 72
Библиография 75

НАЦИОНАЛЬНЫЙ СТАНДАРТ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Автомобильные транспортные средства на водородных топливных элементах

ТОПЛИВНЫЕ СИСТЕМЫ

Технические требования

Hydrogen fuel cell vehicles. Fuel systems. Technical requirements

Дата введения — 2024—05—01

1 Область применения

Настоящий стандарт устанавливает требования, касающиеся ударопрочности и интеграции систем топливных элементов на транспортных средствах, определяет методы испытаний, связанные с интеграцией систем хранения водорода и обработки водорода, системы топливных элементов и электрических систем в транспортных средствах на топливных элементах.

Ударопрочность систем хранения водорода и правила обращения с водородом не рассматриваются в настоящем стандарте.

2 Нормативные ссылки

В настоящем стандарте использованы нормативные ссылки на следующие стандарты:

ГОСТ Р 27.303 (МЭК 60812:2018) Надежность в технике. Анализ видов и последствий отказов

ГОСТ Р 54111.1 Дорожные транспортные средства на топливных элементах. Требования безопасности. Часть 1. Функциональная безопасность транспортного средства

ГОСТ Р 54111.2 Дорожные транспортные средства на топливных элементах. Требования безопасности. Часть 2. Защита от опасностей, связанных с использованием водорода, в транспортных средствах, работающих на сжатом водороде

ГОСТ Р 59102 Электромобили и автомобильные транспортные средства с комбинированными энергоустановками. Термины и определения

ГОСТ Р 70678—2023 Автомобильные транспортные средства на топливных элементах. Термины и определения

ГОСТ Р 70679—2023 Автомобильные транспортные средства на топливных элементах. Порядок обеспечения общей безопасности

ГОСТ Р 70682—2023 Автомобильные транспортные средства на водородных топливных элементах. Транспортные средства категорий N1 и N2. Протоколы заправки газообразным водородом

ГОСТ Р ИСО 14687-1 Водородное топливо. Технические условия

Примечание — При пользовании настоящим стандартом целесообразно проверить действие ссылочных стандартов в информационной системе общего пользования — на официальном сайте Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии в сети Интернет или по ежегодному информационному указателю «Национальные стандарты», который опубликован по состоянию на 1 января текущего года, и по выпускам ежемесячного информационного указателя «Национальные стандарты» за текущий год. Если заменен ссылочный стандарт, на который дана недатированная ссылка, то рекомендуется использовать действующую версию этого стандарта с учетом всех внесенных в данную версию изменений. Если заменен ссылочный стандарт, на который дана датированная ссылка, то рекомендуется использовать версию этого стандарта с указанным выше годом утверждения (принятия). Если после утверждения настоящего стандарта в ссылочный стандарт, на который дана

Издание официальное

датированная ссылка, внесено изменение, затрагивающее положение, на которое дана ссылка, то это положение рекомендуется применять без учета данного изменения. Если ссылочный стандарт отменен без замены, то положение, в котором дана ссылка на него, рекомендуется применять в части, не затрагивающей эту ссылку.

3 Термины, определения, обозначения и сокращения

3.1 Термины и определения

В настоящем стандарте применены термины по ГОСТ Р 59102, а также следующие термины с соответствующими определениями:

3.1.1 **взрыв** (burst): Внезапное высвобождение накопленной энергии и содержимого вследствие функционального или механического сбоя.

3.1.2 **пределы воспламеняемости** (flammability limits): Диапазон концентраций паров горючего газа, при которых возможно распространение пламени в воздухе.

3.1.3 **верхний предел воспламеняемости;** ВПВ (upper flammability limit, UFL): Максимальная концентрация горючего газа/паров в воздухе, при которой возможно распространение пламени.

Примечание — Верхний предел воспламеняемости водорода составляет 74 % в воздухе и 95 % в чистом кислороде, при минимальном объемном содержании кислорода в смеси 5 %.

3.1.4 **нижний предел воспламеняемости;** НПВ (lower flammability limit): Минимальная концентрация горючего газа/паров в воздухе, при которой возможно распространение пламени.

Примечание — Национальные и международные органы по стандартизации признают 4 % водорода в воздухе как нижний предел воспламеняемости. См. ГОСТ Р 54111.1 и ГОСТ Р 54111.2, так как этот критерий применим в одних обстоятельствах и неприменим в других обстоятельствах.

3.1.5 **негорючий** (non-flammable): Среда, которая не может инициировать или поддерживать горение в точке выброса или при рассеивании в окружающей атмосфере (или среде).

3.1.6 **опасные среды** (hazardous fluids): Газы или жидкости, представляющие потенциальную опасность.

Примечание — Опасности, связанные со средами в топливных элементах:

а) воспламеняемость — концентрации топливно-воздушных смесей на уровне или выше НПВ;

б) токсичность — концентрации вредных веществ, превышающие соответствующие предельно допустимые концентрации;

в) высокое давление — среды под высоким давлением в подсистемах подачи топлива, топливных процессорах, топливных элементах и/или подсистемах управления температурным режимом, которые в случае неисправности могут высвобождаться, вызывая травмы у людей;

г) экстремальная температура — жидкости или материалы с очень высокой или низкой температурой, которые могут привести к травмам, таким как ожоги или обморожение;

д) химическая активность — материалы, которые могут вступать в реакцию с другими материалами и могут прямо или косвенно представлять угрозу для здоровья человека.

3.1.7 **опасные материалы** (hazardous materials): Опасные среды или твердые вещества, представляющие потенциальную опасность (например, материалы при экстремальных температурах или давлениях, пиротехнические материалы, высокореактивные материалы или материалы, которые представляют опасность для здоровья).

3.1.8 **водородная топливная система** (hydrogen fuel system): Водородная топливная система, состоящая из системы хранения водорода и системы подготовки водорода.

3.1.9 **система подготовки водорода** (hydrogen handling system): Система, которая обрабатывает водород: редуцирует, увлажняет и т. д. (или газ, обогащенный водородом) и направляет к топливному элементу или двигателю.

3.1.10 **система хранения водорода** (hydrogen storage system): Система хранения водорода, состоящая из баллонов под давлением, устройств сброса давления, запорных клапанов, фитингов и топливопроводов между этими компонентами, которые изолируют хранящийся водород от остальной части топливной системы и окружающей среды.

3.1.11 **утечка** (leak): Выброс жидкости или газа из системы, вызванный дефектом уплотнительных поверхностей соединений трубопроводов с другими компонентами системы или повреждением баллона, трубопроводов и/или других компонентов.

3.1.12 **максимально допустимое рабочее давление;** МДРД (maximum allowable working pressure): Максимальное манометрическое давление рабочей среды (газа или жидкости), на которое рассчитано технологическое оборудование, с учетом устранения неисправностей при превышении нормального режима работы.

3.1.13 **максимальное развиваемое давление** (maximum developed pressure): Максимальное манометрическое давление, возникающее при ошибке управления.

3.1.14 **максимальное давление наполнения** (maximum fill pressure): Максимальное давление наполнения — это максимальное манометрическое давление, указанное изготовителем, которое обычно возникает в процессе заправки топливом.

3.1.15 **максимальное рабочее давление;** МРД (maximum operating pressure): Максимально ожидаемое давление в системе или ее компоненте при нормальной работе, включая запуски, остановки и переходные процессы.

3.1.16 **номинальное рабочее давление;** НРД (nominal working pressure): Манометрическое давление, которым характеризуется номинальный режим работы сосудов высокого давления, других емкостей и систем.

Примечание — Для баллонов со сжатым водородом — это давление заполненного баллона при постоянной температуре газа 15 °С, указываемое производителем.

3.1.17 **нормальная работа** (normal operation): Все переходные и установившиеся режимы работы транспортного средства, возникающие во время запуска, предполагаемой работы и остановки, которые не связаны с отказом компонента или системы.

3.1.18 **периодические производственные испытания** (periodic production test): Испытания, проводимые на случайно выбранных деталях или системах, взятых из обычной партии производственной продукции.

3.1.19 **просачивание** (permeation): Молекулярная диффузия через стенки или поры баллона, трубопровода или материала уплотнений.

3.1.20 **устройство сброса давления;** УСД (pressure relief device): Клапан или предохранительное устройство (разрывной элемент), автоматически снижающие избыточное давление.

3.1.21 **предохранительный клапан** (pressure relief valve): Устройство сброса давления, которое открывается при заданном уровне давления и снова закрывается при снижении давления до определенной величины.

3.1.22 **квалификационное [проверочное] испытание** (qualification (verification) test): Испытание одного или нескольких устройств, проводимое в рамках аттестации, в целях подтверждения их пригодности для практического применения и соответствия данным спецификации.

Примечание — Квалификационное испытание также называют типовым, проверочным или прототипным.

3.1.23 **гидрид металла** (reversible metal hydride): Соединение металла с водородом, которое находится в условиях равновесия при нормальных условиях.

Примечание — Изменения давления, температуры или электрического потенциала смещают равновесие в сторону образования или разложения соединения металла и водорода в сторону высвобождения или связывания водорода с металлом.

3.1.24 **плановое производственное испытание** (routine production test): Испытание, которому подвергается каждая отдельная производственная деталь, узел или система во время изготовления или после него, чтобы установить их соответствие заявленным критериям.

3.1.25 **разрыв** (rupture): Форма повреждения, которая приводит к высвобождению содержимого.

3.1.26 **циклы давления утечки;** ЦДУ**:** Количество циклов изменения давления до появления утечки или удвоенное значение количества циклов испытаний на долговечность, в зависимости от того, какое значение меньше.

3.2 Обозначения и сокращения

В настоящем стандарте использованы следующие обозначения и сокращения:

N_E — количество ожидаемых рабочих циклов;

N_D — количество циклов на долговечность;

N_H — количество циклов давления при температуре окружающей среды;

M_H — количество циклов давления при экстремальных температурах;
BP_0 — начальное давление разрыва;
BP_{DQ} — среднее давление разрыва новых баллонов;
BP_{min} — минимально допустимое давление разрыва;
Н33 — класс давления до 330 бар;
Н70 — класс давления до 700 бар;
S_y — заданный минимальный предел текучести, МПа;
S_U — заданный минимальный предел прочности, МПа;
El — заданное минимальное удлинение, %;
S_{UTS} — предел прочности материала на растяжение, МПа;
КСД — клапан сброса давления;
ТРК — топливораздаточная колонка;
СХКВ — система хранения сжатого (компримированного) водорода;
СХЖВ — система хранения сжиженного водорода;
ТС — транспортное средство;
ТУСД — термически-активируемое устройство сброса давления;
ИР — испытание на растяжение;
ОУП — относительное уменьшение площади;
СПГ — сжиженный природный газ.

4 Общие требования

4.1 Технические требования

В таблице 1 представлены общие требования.

Таблица 1 — Общие требования

Аспект требований	Структурный элемент	Разработка	Аттестация проекта	Производство
Конструктивные требования	4.1	x		
Общие требования к функциональной безопасности	4.1.1	x		
Воздействие опасных материалов	4.1.1.1	x		
Автоматическое аварийное отключение подачи топлива	4.1.1.2	x		
Ручное отключение подачи топлива	4.1.1.3	x		
Управление воспламеняющимися условиями	4.1.1.4	x		
Защита от избыточного давления	4.1.1.5	x		
Термическая защита (перегрев)	4.1.1.6	x		
Мониторинг неисправностей	4.1.1.7	x		
Условия обслуживания	4.1.2	x		
Давление	4.1.2.1	x		
Температура	4.1.2.2	x		
Качество топлива	4.1.2.3	x		
Удар и вибрация	4.1.2.4	x		
Срок службы и долговечность	4.1.2.5	x		

Окончание таблицы 1

Аспект требований	Структурный элемент	Разработка	Аттестация проекта	Производство
Выбор материала	4.1.3	x		
Совместимость с водородом	4.1.3.1	x		
Совместимость с жидким топливом	4.1.3.2	x		
Тепловые воздействия	4.1.3.3	x		
Коррозия и другие внешние воздействия	4.1.3.4	x	x	
Требования к конструкции	4.2		x	
Проверка производительности	4.2.1		x	
Проверка производительности по сравнению с ожидаемым сервисом	4.2.1.1		x	
Проверка долговечности в экстремальных условиях и при длительном использовании	4.2.1.2		x	
Условия прекращения обслуживания	4.2.1.3		x	
Проверка и валидация производственного процесса	4.3		x	
Система контроля качества	4.3.1			x
Проверка процесса	4.3.2			x
Производственные испытания	4.3.3			x
Интеграция ТС	4.4			
Маркировка	4.4.1	x		x
Установка и монтаж	4.4.2	x		x
Системы выбросов	4.4.3	x		x
Заправка и слив топлива	4.4.4	x		x
Руководство по эксплуатации	4.4.5			x
Аварийное реагирование	4.4.6	x		x
Техническое обслуживание	4.4.7	x		x
Ограничения обслуживания	4.4.8	x		

4.1.1 Общие требования безопасности

4.1.1.1 Общая цель проектирования системы заключается в том, чтобы единичный сбой аппаратного или программного обеспечения не приводил к риску нарушения безопасности любого человека или к неуправляемому поведению ТС. Требования к системам хранения и обращения с водородом предназначены для сведения к минимуму вероятности единичных отказов ТС:

- необходимо соблюдение технических требований не только на стадии запуска и отладки, но и на протяжении всего срока эксплуатации;
- необходимо незамедлительное обнаружение и устранение неисправностей в системах обращения с топливом;
- требуется выявлять и сообщать о неисправностях в организации, осуществляющие контроль за работой систем.

Для обеспечения выполнения требований 4.1 следует провести оценку рисков для распознавания режимов отказов и управления ими согласно ГОСТ Р 27.303. Целью процесса является выявление неисправностей, которые могут привести к возникновению опасных ситуаций, как внутренних, так и внешних по отношению к системе в ТС или его окружении. Целью также является выявление потенциальных

неисправностей, распознавание последствий этих неисправностей и определение контрмер для минимизации опасностей. Нормальная работа, а также возможные сбои должны быть исследованы на предмет возникновения внутренних или внешних опасностей. Следует учитывать как отказы компонентов, так и рабочие неисправности.

Необходимо контролировать воздействие на людей потенциально опасных материалов (как определено в 3.4 и 3.5). Требования к системе заправки, слива топлива, а также к системам выбросов приведены в 4.4.

4.1.1.2 Автоматическое аварийное отключение подачи топлива

Производителями ТРК должны быть предусмотрены автоматические средства предотвращения утечек топлива в результате единичных отказов функции отключения. Данная функция может выполняться закрытием запорной арматуры, отключением насосов, продувкой и другими способами в зависимости от типа, состояния и давления топлива в баллоне. Если на ТС установлено несколько топливных систем, то должны быть предусмотрены автоматические выключатели для изоляции каждой топливной системы. Дополнительная информация — по ГОСТ Р 54111.1.

4.1.1.3 Ручное отключение подачи топлива

В системах хранения для технического обслуживания ТС должна быть предусмотрена функция ручного отключения. Эта функция может быть обеспечена ручным управлением автоматическими запорными клапанами или использованием ручных запорных клапанов.

4.1.1.4 Контроль пожарной безопасности

В топливной системе или процессе, в котором используется управляемая(ые) реакция(и) окисления, например в каталитических горелках, реакторах или термических горелках, производителям ТС следует организовать контроль за потенциальным образованием легковоспламеняющихся веществ. Необходимо обратить внимание на следующее:

- продувка перед началом реакции в случае необходимости;
- регулировка топливовоздушной смеси во время работы, по мере необходимости;
- отключение подачи реагента, продувка или пассивация, по мере необходимости, после отключения.

Производителями ТС должен быть обеспечен контроль неисправностей в соответствии с 4.1.1.7, чтобы гарантировать, что реакция проходит в установленных пределах процесса во всех режимах работы.

Необходимо рассматривать возможное образование горючих смесей из-за отказов в топливных системах, включая термические и каталитические горелки, если таковые имеются. В частности, при проектировании следует учитывать возможность подсоса воздуха, поперечного или обратного потока воздуха в топливопроводах или топлива в воздуховодах. Должны быть приняты контрмеры для предотвращения опасных ситуаций, таких как повышение давления и температуры из-за реакции воспламеняющейся смеси. Конструкция топливной системы должна быть в состоянии сдерживать или сбрасывать эти повышения давления и температуры и управлять распространением реакции на другие участки топливной системы или во внешнюю среду.

Потенциальное образование легковоспламеняющихся веществ вне топливной системы необходимо контролировать в соответствии с 4.4.3.

4.1.1.5 Защита от избыточного давления

Система должна иметь защиту для предотвращения взрыва в случае избыточного давления из-за сбоев в системе и внешних воздействий.

Защита от избыточного давления различных типов систем хранения и переработки топлива приведена в разделе 5.

4.1.1.6 Термическая защита

При проектировании топливных систем следует предусмотреть защиту от перегрева, чтобы предотвратить выброс опасных веществ и образование источников воспламенения. В случае пожара выброс водорода должен происходить контролируемым образом, чтобы предотвратить повреждение системы (см. [1]).

4.1.1.7 Мониторинг неисправностей

В мониторинг неисправностей необходимо включать любые отказы, связанные с критически важными функциями и безопасностью, такие как избыточное давление, перегрев и утечка топлива. Топливная система должна включать в себя датчики и/или переключатели для обеспечения обнаружения неисправности потребителем для получения рекомендаций по внедрению поэтапных предупреждений и выключений (см. [1]).

В некоторых случаях управление топливной системой не в состоянии блокировать неисправность, следовательно необходимы другие системы внутри ТС. Это необходимо учитывать при разработке архитектуры и системы обмена информацией на борту ТС.

4.1.2 Условия обслуживания

4.1.2.1 Давление

МРД должно быть установлено для систем хранения и обращения с водородом производителем данных систем. При установлении значения МРД производителем должны быть учтены все режимы работы, включая дозаправку, пуск и остановку.

Максимальное расчетное давление компонентов и/или систем должно быть больше, чем МРД, так как:

- для компонентов или систем, использующих системы регулирования давления, при выборе максимально развиваемого давления следует учитывать запас выше МРД, чтобы избежать непреднамеренного срабатывания системы регулирования во время нормальной работы;
- компоненты, расположенные ниже по потоку от одного редукционного регулятора, должны быть способны выдерживать давление, возникающее в результате отказа предыдущего по потоку регулятора давления, или должны быть защищены другими отказоустойчивыми средствами управления (см. [1]);
- компоненты, содержащие более одного потока жидкости (например, теплообменник), должны надежно изолировать эти потоки, если только система не имеет функций, делающих это требование излишним (см. 5.2).

4.1.2.2 Температура

Материалы и компоненты, применяемые при проектировании, должны быть подходящими к использованию в ожидаемых температурах окружающей среды. Если производитель ТС не указывает температуру окружающей среды, то принимается диапазон от минус 40 °С до 85 °С. Некоторые материалы и компоненты могут подвергаться воздействию рабочих температур, выходящих за указанные выше пределы, и это необходимо учитывать в процессе проектирования.

4.1.2.3 Качество топлива

При проектировании топливных систем следует учитывать содержание вредных примесей в топливе, которые могут влиять на работу компонентов, связанных с безопасностью в соответствии с ГОСТ Р ИСО 14687-1.

4.1.2.4 Удары и вибрация

Системам, устанавливаемым на ТС, следует выдерживать ударные нагрузки и вибрацию в соответствии с требованиями производителя ТС.

4.1.2.5 Обслуживание и долговечность

При проектировании компонентов, работающих под давлением, и критических с точки зрения безопасности компонентов, следует учитывать циклическую усталость (заправка и запуск/остановка) и износ в зависимости от предполагаемого использования и технического обслуживания, включая условия эксплуатации ТС. Если не указаны требования для конкретной системы или компонента, то необходимо использовать следующие общие рекомендации установки минимальных требований к квалификации и производственным испытаниям на основе спецификаций производителя ТС:

а) количество циклов пуска/остановки рассчитывается делением расчетного пробега на весь срок службы на ожидаемую среднюю продолжительность поездки 20 км. [N (циклы) = L (км) / 20 (км/цикл)];

б) количество циклов заправки рассчитывается как расчетный пробег автомобиля за весь срок службы, деленный на эффективный запас хода автомобиля на основе ожидаемого расхода топлива на одну заправку. [L(км) / R(км)]. Для коммерческого использования количество циклов в течение срока службы от 15 до 25 лет.

4.1.3 Выбор материала

Компоненты должны быть изготовлены из материалов, соответствующих установленному сроку службы ТС. Критерии выбора материалов, используемых для отдельных видов топлива, приведены в разделе 5.

4.1.3.1 Совместимость с водородом

Материалы, используемые при изготовлении компонентов, должны быть совместимы с составом топлива, включая ожидаемые примеси при производстве и доставке. В частности, следует учитывать охрупчивание и другие виды разрушения материалов из-за воздействия на них водорода при рабочем диапазоне температур и давления. Руководство по выбору материала приведено в приложении А.

4.1.3.2 Совместимость с жидким топливом

Все материалы трубопроводов, резьбовые соединения и уплотнители, используемые для жидкого топлива, не должны приводить к ухудшению работы системы или нарушать ее работу из-за взаимодействия с топливом. Руководство по оценке приведено в ГОСТ Р ИСО 14687-1.

4.1.3.3 Температурное воздействие

Использование материалов должно соответствовать диапазонам температур окружающей среды и рабочей температуры, установленным в 4.1.2.2. Термическое окисление, упругая деформация, пластическая деформация, ползучесть и сопротивление нагреву материалов необходимо учитывать в оценке механической целостности или герметизирующей способности. Кроме того, материалы, используемые для хранения легковоспламеняющихся или реакционноспособных сред, не должны способствовать распространению пламени.

4.1.3.4 Коррозия и другие внешние воздействия

Материалы должны быть устойчивы к коррозии и другим разрушениям, вызванным погодными условиями, солевыми и другими дорожными брызгами, ультрафиолетовым светом (солнечным светом), жидкостями дорожного транспорта (бензин, гидравлические жидкости, аккумуляторная кислота, жидкость для омывания ветрового стекла, гликоли, масла и т. д.) (см. Б.10).

4.2 Требования к конструкции

Системы следует спроектировать и построить таким образом, чтобы водород хранился в безопасных условиях эксплуатации и выполнялись критически важные для безопасности функции управления в течение всего срока службы в условиях, установленных в 4.1 и 4.2.2.

4.2.1 Оценка по результатам проверок

Системы должны быть изготовлены и собраны в условиях серийного производства и пройти ряд проверочных испытаний, которые имитируют полный рабочий диапазон системы на протяжении всего ее срока службы, включая как нормальную работу, так и сервисное обслуживание. Общее руководство по организации проверок приведено в 4.2.2.1 и 4.2.2.2, а специальное руководство для различных типов систем хранения и обработки водорода приведено в разделе 5.

4.2.1.1 Проверка работы

Системы хранения и обработки водорода должны обладать требуемой работоспособностью во всем диапазоне условий окружающей среды и эксплуатации, установленном производителем.

Проверочные испытания могут выполняться комплексно — с участием всех элементов системы или, на усмотрение изготовителя, могут выполняться на частях системы, если в конечном итоге совокупный результат подтверждает, что вся система в сборе работоспособна.

После воздействия всех допустимых условий эксплуатации системы необходимо выполнять требования устойчивости к утечкам и применению давления разрыва, как указано в разделе 5.

4.2.1.2 Проверка долговечности в экстремальных условиях и при длительной эксплуатации

Эксплуатационные характеристики систем хранения и обращения с водородом должны быть определены таким образом, чтобы в условиях наибольших нагрузок, приводящих к износу и деградации, не ограничивался срок службы.

Проверочные испытания могут выполняться комплексно — с участием всех элементов системы или, по усмотрению изготовителя, могут выполняться на частях системы, если в конечном итоге совокупный результат подтверждает, что вся система в сборе работоспособна. Воздействия могут выполняться одновременно или последовательно, в зависимости от особенностей применения компонента и условий эксплуатации.

Следует учитывать условия окружающей среды и эксплуатации, а также любые другие нагрузки или рабочие циклы, связанные с конкретным применением. Системы хранения и обработки должны быть подвержены возможным экстремальным воздействиям в дорожных условиях. Примеры экстремальных условий и длительного использования перечислены ниже, а испытания конкретных типов систем хранения водорода представлены ниже и в разделе 5.

4.2.1.2.1 Механическое воздействие

Системы хранения и обращения с водородом необходимо проектировать таким образом, чтобы выдерживать повреждения, вызванные транспортировкой и небрежным обращением (например, падение), либо защищать от установки в систему любых поврежденных компонентов систем хранения или обращения. Системы хранения и обращения с водородом должны быть оценены на соответствующую устойчивость к потенциальному истиранию в местах их крепления в ТС.

4.2.1.2.2 Химическое воздействие

Системы хранения и обработки должны быть проверены на воздействие химически активных сред, характерных для сред в окружающей среде (кислоты, щелочи и соли: серная кислота, гидроксид натрия и нитрат аммония) и на борту ТС (жидкость для омывания ветрового стекла). Проверка включает все критические и чувствительные элементы системы.

4.2.1.2.3 Долговечность

Системы хранения и обращения с водородом следует подвергать циклам заправки, включению/выключению и рабочим циклам сверх тех, которые определены в 4.1.2, для оценки долговечности при усталости и износе от экстремального использования.

4.2.1.3 Условия прекращения обслуживания

Аттестация системы хранения водорода должна учитывать возможные условия прекращения эксплуатации, такие как, например, возгорание или пробитие, при этом система должна обладать эффективным управлением неисправностями, сводящим к минимуму опасность в условиях прекращения обслуживания.

4.3 Проверки производственного процесса

4.3.1 Системы контроля качества

Изготовитель компонентов и систем должен поддерживать систему контроля качества производства для обеспечения надлежащего уровня обработки материалов, методов изготовления/сборки и производственных испытаний, своевременно устранять недостатки и контролировать соответствие готовой продукции проектным требованиям.

4.3.2 Контроль производственного процесса

Производственные и сборочные процессы необходимо организовывать так, чтобы критические для безопасности критерии, указанные в 4.2, постоянно выполнялись во время производства.

4.3.3 Производственные испытания

Изготовитель должен определить, требуются ли проверки или испытания в процессе производства и сборки, чтобы обеспечить соблюдение условий безопасности системы. При необходимости изготовителю следует организовать такие проверки и испытания. Тип и частота таких проверок и испытаний определяются производителем и призваны обеспечить соответствие продукта внутренним требованиям к качеству, а также применяемым стандартам.

4.3.3.1 Текущие производственные испытания

Текущие производственные испытания проводятся для каждой детали, компонента или узла на определенном этапе производственного или сборочного процесса, когда производитель считает это необходимым. Производственные испытания под давлением и испытания на герметичность проводятся в условиях, указанных производителем компонентов или требуемых стандартами (см. Б.1 и Б.2 для руководства по проведению контрольных испытаний под давлением и испытаний на герметичность). Эти испытания могут проводиться одновременно или раздельно по усмотрению изготовителя.

4.3.3.2 Периодические производственные испытания

В процессе производства контроль качества требует периодических испытаний и осмотров продукции. Необходимость и частота периодических испытаний определяются производителем в целях удовлетворения внутренних требований к качеству или применяемых стандартов.

В некоторых случаях производство деталей или компонентов может осуществляться партиями. Размер производственной партии должен определяться производителем с учетом требований к качеству. Для периодических производственных испытаний образцы для испытаний следует выбирать из партии случайным образом.

4.4 Интеграция с транспортным средством

4.4.1 Маркировка

Изготовитель компонентов и оборудования должен обеспечить надлежащую идентификацию своих изделий и соответствие маркировки государственным нормам.

4.4.1.1 Средства идентификации

Необходимо, чтобы компоненты, клапаны, регуляторы давления, предохранительные устройства и другое технологическое оборудование (за исключением трубок и фитингов) имели штампы или иную долговременную маркировку с указанием названия или символа производителя, номера детали и серийного номера. Также может быть включена другая информация, если она критична для безопасности

или требуется для соответствия применяемому производственному стандарту. После установки компонента его этикетки и штампы должны просматриваться и быть читаемыми.

4.4.1.2 Знаки безопасности

Для предупреждения о потенциальных опасностях, связанных с эксплуатацией и обслуживанием ТС необходимо использовать знаки безопасности в виде этикеток, ярлыков, специальных меток и прочих средств маркировки. В случае необходимости для правильной установки компонента должно быть указано направление потока (см. раздел 5). Кроме того, компоненты в линиях заправки сжатым водородом и линиях подачи до редукционного регулятора включительно должны быть как минимум маркированы по классу давления.

4.4.2 Установка и монтаж

Все компоненты, соединительные трубопроводы и провода следует надежно устанавливать и закреплять в ТС в соответствии с ГОСТ Р 70679 и располагать таким образом, чтобы его компоненты, трубопроводы, фитинги и клапаны были защищены от повреждений в результате контакта с различными объектами, возникающего во время нормальной эксплуатации ТС.

Система хранения водорода должна быть установлена таким образом, чтобы температура баллонов не поднималась выше 85 °С, а также, при необходимости, обеспечивала тепловую защиту баллонов с водородом от выхлопной системы и других источников тепла, включая прямое воздействие солнечных лучей.

4.4.2.1 Управление потенциально опасными факторами в салоне ТС

Все компоненты, хранящие, содержащие или выделяющие опасные среды, необходимо располагать в местах, в которых предусмотрены средства для управления сбросами и выбросами легковоспламеняющихся сред.

4.4.2.2 Потенциальные источники воспламенения

Электрическое и иное оборудование, расположенное в пространствах с реально или потенциально воспламеняющимися при единичных неисправностях средами, должно быть пригодным для применения в этих средах и не вызывать непреднамеренного воспламенения.

Оборудование следует надлежащим образом соединять и заземлять для предотвращения электростатических разрядов.

4.4.2.3 Электрическая безопасность

Установка электрических систем и оборудования должна соответствовать правилам безопасности (см. требования ГОСТ Р 70679).

4.4.2.4 Обнаружение утечек

Обнаружение утечек является неотъемлемой частью системы обращения с топливом (см. требования ГОСТ 70679).

4.4.3 Системы выбросов

Поставщик топливных систем должен учитывать следующие требования и работать с изготовителем ТС для того, чтобы пункты 4.4.3.1—4.4.3.3 соблюдались при интеграции топливной системы в ТС.

4.4.3.1 Системы штатных выбросов

Все выхлопные, продувочные, вентиляционные и другие штатные выпускные системы необходимо проектировать, изготавливать и располагать таким образом, чтобы выброс потоков из ТС в пассажирский салон или внутри ТС не представлял опасности (см. ГОСТ Р 70679).

4.4.3.2 Выбросы из устройств сброса давления

Системы выпуска топлива или других опасных сред в случае неисправности или аварии должны соответствовать рекомендациям по проектированию, конструкции и размещению, приведенным в ГОСТ Р 70679.

4.4.3.3 Сопутствующие выбросы

Сбросы воды или других сопутствующих продуктов работы системы не должны быть опасными.

4.4.4 Заправка и слив топлива

Возможность слива топлива, а также заправки ТС следует обеспечивать в соответствии с ГОСТ Р 70679. Информация о заправке и сливе топлива должна быть предоставлена в соответствии с 4.4.5 и 4.4.7. Специальные требования, если таковые имеются, в отношении первой заправки ТС также должны быть указаны в процедурах обслуживания.

4.4.5 Руководство пользователя или инструкция

Изготовитель оборудования топливной системы должен предоставить производителю ТС соответствующую информацию согласно ГОСТ Р 70679.

В руководстве пользователя необходимо указывать ограничение срока службы системы хранения в соответствии с 4.4.8 настоящего стандарта и рекомендации, если таковые имеются, для производителя ТС по периодическому осмотру или техническому обслуживанию.

4.4.6 Реагирования при чрезвычайных ситуациях

Изготовитель оборудования топливной системы должен предоставить производителю ТС соответствующую информацию согласно ГОСТ Р 70679.

Водородные пожары необходимо тушить путем отключения подачи топлива. Обычные методы пожаротушения (например, тушение пламени водой) могут привести к образованию горючих смесей и возможным взрывам.

4.4.7 Техническое обслуживание

Изготовитель оборудования топливной системы должен предоставить производителю ТС соответствующую информацию согласно ГОСТ Р 70679.

4.4.8 Ограничения срока службы

Подлежащие установке на ТС системы, включая их материалы и компоненты, должны выполнять свои функции, включая удержание водорода и выполнение критических с точки зрения безопасности функций, в течение всего ожидаемого срока службы ТС, если иное не указано в последующих разделах настоящего стандарта, а также не выявлено производителем ТС в ходе обязательных проверок или эксплуатационного обслуживания и не определено им в руководстве по эксплуатации.

Если срок службы системы хранения определен в результате квалификационных испытаний, описанных в разделе 5, то ее следует вывести из эксплуатации по истечении этого срока.

5 Эксплуатационные требования к системам хранения и переработки водорода

5.1 Сжиженный водород

Общие требования к водородным топливным системам, приведенные в разделе 4, применяются к системам хранения сжиженного водорода и системам обращения с топливом. В этом разделе приведены особые требования к СХЖВ.

СХЖВ состоит из герметичного(ых) сосуда(ов) для сжиженного водорода, клапанов сброса давления, запорных устройств, а также всех компонентов, фитингов и топливных трубопроводов между сосудом(ами) и этими запорными устройствами, изолирующими сжиженный водород от остальной части топливной системы и окружающей среды.

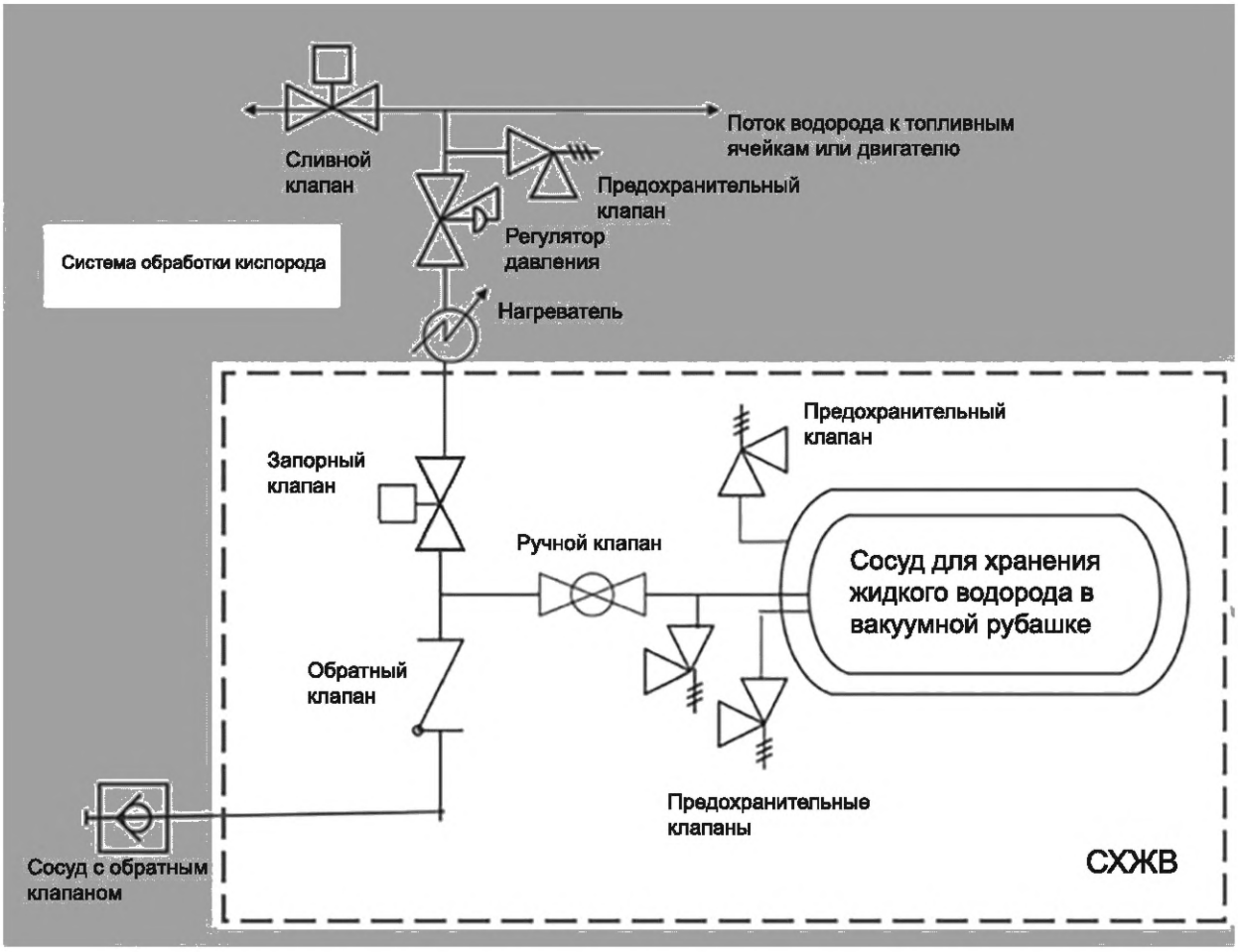
Общий вариант топливной системы на сжиженном водороде показан на рисунке 1. СХЖВ показана в незаштрихованной области; в заштрихованную область на рисунке помещена система обработки водорода. В реальных СХЖВ и системах обработки могут варьироваться типы, количества, конфигурации и расположения функциональных компонентов, например в некоторых системах теплообменник может быть встроен в сосуд для хранения, а не расположен в последующих участках водородной системы. Выбор и конфигурация компонентов также могут различаться в зависимости от конструкции системы хранения. Например, несколько деталей объединены в один корпус клапана или расположены непосредственно на горловине баллона. В целом границы СХЖВ определяются возможностью изоляции хранящегося сжиженного (или газообразного) водорода от остальной части топливной системы и окружающей среды. На все компоненты, расположенные в пределах этих границ, распространяются требования, определенные в этом разделе, в то время как на компоненты за пределами границ СХЖВ распространяются общие требования, изложенные в разделе 4.

СХЖВ на рисунке 1 имеет следующие характеристики:

- во время заправки сжиженный водород вытекает из сопла на заправочной станции и поступает в систему через приемную емкость на ТС. Затем водород проходит через обратный клапан (или запорный клапан) в баллон хранения сжиженного водорода;
- для того, чтобы хранящийся водород оставался в жидком состоянии, баллон хорошо изолирован с использованием, в том числе, вакуумной оболочки, окружающей баллон;
- КСД защищают баллон(ы) и систему от взрыва в случаях превышения установленного давления водорода в системе вследствие теплопередачи из окружающей среды или пожара. Эти клапаны также защищают баллоны с вакуумной оболочкой;
- водород поступает в двигательную установку из СХЖВ через запорный клапан. Поток водорода из баллонов для хранения может быть однофазным или двухфазным;

- теплообменник в системе испаряет любой сжиженный водород и нагревает газообразный водород до температуры, требуемой для последующей подготовки;
- в случае обнаружения неисправности в двигательной установке системы безопасности ТС перекрывают поступление водорода из баллона хранения с помощью запорного клапана.

В таблице 2 перечислены аспекты различных требований, рассматриваемые в каждом из этих разделов, а также указано, применяются ли требования к проектированию, конструкции или производству.



Светлая область — система хранения жидкого водорода; темная область — система подачи топлива.

Рисунок 1 — Общий вариант топливной системы на сжиженном водороде

Таблица 2 — Применение требований СХЖВ

Аспект требований	Структурный элемент	Разработка	Аттестация проекта	Производство
Требования к проектированию	4.1	x		
Общие требования к функциональной безопасности	4.1.1	x		
Опасные материалы	5.1.1	x		
Автоматическое отключение водорода	5.1.2	x		
Ручное отключение подачи топлива	4.1.1.3	x		
Управление воспламеняющимися условиями	5.1.3	x		

Окончание таблицы 2

Аспект требований	Структурный элемент	Разработка	Аттестация проекта	Производство
Защита от избыточного давления	5.1.4	x		
Термическая защита (перегрев)	4.1.1.6	x		
Мониторинг неисправностей	5.1.5	x		
Условия обслуживания	4.1.2	x		
Давление	4.1.2.1	x		
Температура	5.1.6	x		
Качество топлива	4.1.2.3	x		
Удар и вибрация	4.1.2.4	x		
Ожидаемый срок службы и долговечность	5.1.7	x		
Выбор материала	4.1.3	x		
Совместимость с водородом	4.1.3.1	x		
Совместимость с жидким топливом	4.1.3.2	x		
Тепловые воздействия	4.1.3.3	x		
Коррозия и другие внешние воздействия	4.1.3.4	x		
Требования к конструкции	5.1.8		x	
Соответствие признанным кодексам, стандартам или директивам				
Проверка производительности				
Проверка производительности по сравнению с ожидаемым сервисом				
Проверка долговечности в экстремальных условиях и при длительном использовании				
Условия прекращения обслуживания				
Проверка и валидация производственного процесса	4.3		x	x
Система контроля Качества	4.3.1			x
Проверка процесса	4.3.2			x
Производственные испытания	4.3.3			x
Интеграция ТС	4.4	x		x
Маркировка	4.4.1			x
Установка и монтаж	5.1.9	x		x
Нормальные системы выбросов	5.1.10	x		x
Заправка и слив топлива	5.1.11	x		x
Руководство по эксплуатации	4.4.5			x
Аварийное реагирование	5.1.12	x		x
Техническое обслуживание	4.4.7	x		x
Ограничения обслуживания	4.4.8	x		

5.1.1 Опасные материалы

В соответствии с 4.1.1.1 криогенные среды, в частности водород, представляют опасность из-за очень низкой температуры среды и материалов, с которыми они контактируют. На этапе проектирования системы необходимо учитывать возможность контакта жидкого водорода с ее компонентами.

5.1.2 Автоматическое отключение водорода

В соответствии с 4.1.1.2 топливная система должна перекрывать подачу топлива через предохранительные устройства. Эти устройства следует располагать как можно ближе к выходному отверстию баллона.

Трубопровод, подающий жидкий водород, может быть оснащен перепускным клапаном, который закрывается в случае разрыва линии или ненормальных условий потока в дополнение к автоматической отсечке подачи топлива.

5.1.3 Контроль пожарной безопасности

В рамках оценки по 4.1.1.4 должно быть рассмотрено образование горючих смесей из-за возможного попадания воздуха в топливную систему. Например, воздух может быть втянут в холодный пустой баллон, если клапаны были оставлены открытыми. Кроме того, материалы и конструкция должны сводить к минимуму риск, связанный со сжижением и скоплением богатого кислородом воздуха в системе. Будучи инертными в обычных условиях, некоторые материалы могут легче воспламеняться в присутствии более высоких концентраций кислорода.

5.1.4 Защита от избыточного давления

Предохранительные клапаны необходимо использовать для защиты от избыточного давления в СХЖВ, поскольку криогенные среды склонны к испарению и накоплению паров в баллоне. Давление испарения может превышать 100 МПа, поэтому все узлы, в которых возможно скопление жидкости, должны быть оборудованы предохранительным клапаном. Кроме того, при проектировании следует учитывать возможность того, что загрязняющие примеси в сжиженном водороде могут затвердеть и заблокировать потоки, поэтому при необходимости следует использовать резервные предохранительные клапаны (от отдельных точек системы), чтобы обеспечить возможность удаления паров и исключения избыточного давления.

Вакуумная оболочка, окружающая емкость для хранения сжиженного водорода, также должна быть защищена предохранительным клапаном.

5.1.5 Мониторинг неисправностей

Потенциальные неисправности системы следует отслеживать и устранять в соответствии с 4.1.1.7. Для криогенных систем должны быть предусмотрены аппаратное резервирование и/или достаточное качество приборов из-за экстремальных температур и очень низкой плотности жидкого водорода.

В системе сжиженного водорода необходимо решить вопросы:

- замерзания воздуха, который непреднамеренно попал в систему (вызывает закупорку трубопроводов и клапанов и риск повышения воспламеняемости);
- разгерметизации или потери вакуума.

5.1.6 Температура

Система должна быть спроектирована из материалов, способных выдерживать воздействие среды, которую они удерживают. Внутренний сосуд высокого давления должен быть рассчитан на работу при температуре минус 253 °С. Трубопровод заполнения и трубопровод перед испарителем также должны быть рассчитаны на эту температуру. Остальную часть системы следует проектировать таким образом, чтобы выдерживать температуры, которые могут возникнуть после установки в ТС.

5.1.7 Ожидаемый срок службы и долговечность

Система должна быть спроектирована таким образом, чтобы выдерживать по меньшей мере двукратное ожидаемое количество циклов заполнения, предусмотренных в 4.1.2.5.

5.1.8 Аттестация проекта

СХЖВ следует проектировать в соответствии с разделом 4.2 с учетом характеристик сжиженного водорода, обозначенных в разделах 5.1.1—5.1.7. Для аттестации проекта оборудования и систем следует использовать соответствующие стандарты. В рамках процесса аттестации проекта характеристики, определенные ниже, проверяют с учетом ожидаемого срока службы.

5.1.8.1 Гидравлические испытания

СХЖВ должна выдерживать повышение давления до максимально развиваемого давления без деформации или необратимого повреждения каких-либо компонентов или деталей.

Примечание — См. 4.1.2.1, 5.1.4 для руководства по установлению максимально развиваемого устройством давления системы.

5.1.8.2 Испытания на герметичность

В соответствии с ГОСТ Р 70679 общий выброс водорода из-за утечек, просачивания или нормального сброса газов и испарений из СХЖВ в стандартных пассажирских ТС должен быть не более A×150 см^3/мин. Значение A вычисляют по формуле

$$A = (V_ш + 1) \cdot (V_в + 0{,}5) \cdot (V_д + 1) / 30{,}4, \quad (1)$$

где $V_ш$ — ширина ТС, м;
$V_в$ — высота ТС, м;
$V_д$ — длина ТС, м.

Испытание на герметичность следует проводить после гидравлических испытаний.

Примечания

1 Приведенный выше выброс водорода относится также и к системам хранения сжатого водорода (см. обоснование в приложении В).

2 Обезвреживание испарений водорода на ТС перед сбросом их за пределы ТС (например, путем каталитического сжигания) может быть учтено как часть выполнения настоящего требования, однако следует учитывать потребление кислорода в минимально вентилируемых местах в соответствии с ГОСТ Р 70679.

5.1.9 Установка и монтаж

Вакуумная оболочка, окружающая сосуд высокого давления с жидким водородом, должна быть защищена от повреждений и нарушения герметичности изоляции. Необходимо присутствие конструктивных решений по защите вспомогательных компонентов — регуляторов, манометров, трубопроводов и т. д., если их выход из строя может привести к аварийному выбросу жидкости или пара.

5.1.10 Системы выпуска штатных выбросов

Системы управления выбросами должны соответствовать требованиям к штатным выбросам, определенным в ГОСТ Р 70679. Испытания, предназначенные для оценки выхлопов ТС, в частности при парковке в помещениях без принудительной вентиляции, не следует проводить, пока не решены проблемы утечек.

5.1.11 Заправка и слив топлива

При проектировании должна быть учтена безопасность и эффективность заправки и слива топлива.

Перед заправкой система (включая все заправочное оборудование: соединители, шланги и т. д.) всегда должна продуваться инертным газом. Предпочтительным инертным газом является гелий, так как он не замерзает и не закупоривает каналы при контакте с холодным водородом. После инертной продувки систему можно продуть теплым водородом непосредственно перед заправкой. Конструкция соединений должна предотвращать попадание в систему продуктов, отличных от водорода.

Слив топлива сопровождают безопасным улавливанием жидкого водорода или безопасным удалением в атмосферу, абсорбенты либо в баллоны.

5.1.12 Действия при чрезвычайных ситуациях

В дополнение к выполнению требований 4.4.6 изготовитель топливной системы должен предоставить соответствующую информацию о действиях при чрезвычайных ситуациях. Жидкий водород испаряется быстро и без остатка, поэтому действия при чрезвычайных ситуациях обычно ограничиваются нахождением граждан на безопасном расстоянии от системы до тех пор, пока водород не улетучится. Оставшийся в системе водород при этом следует как можно скорее удалить из системы.

5.2 Система хранения сжатого водорода

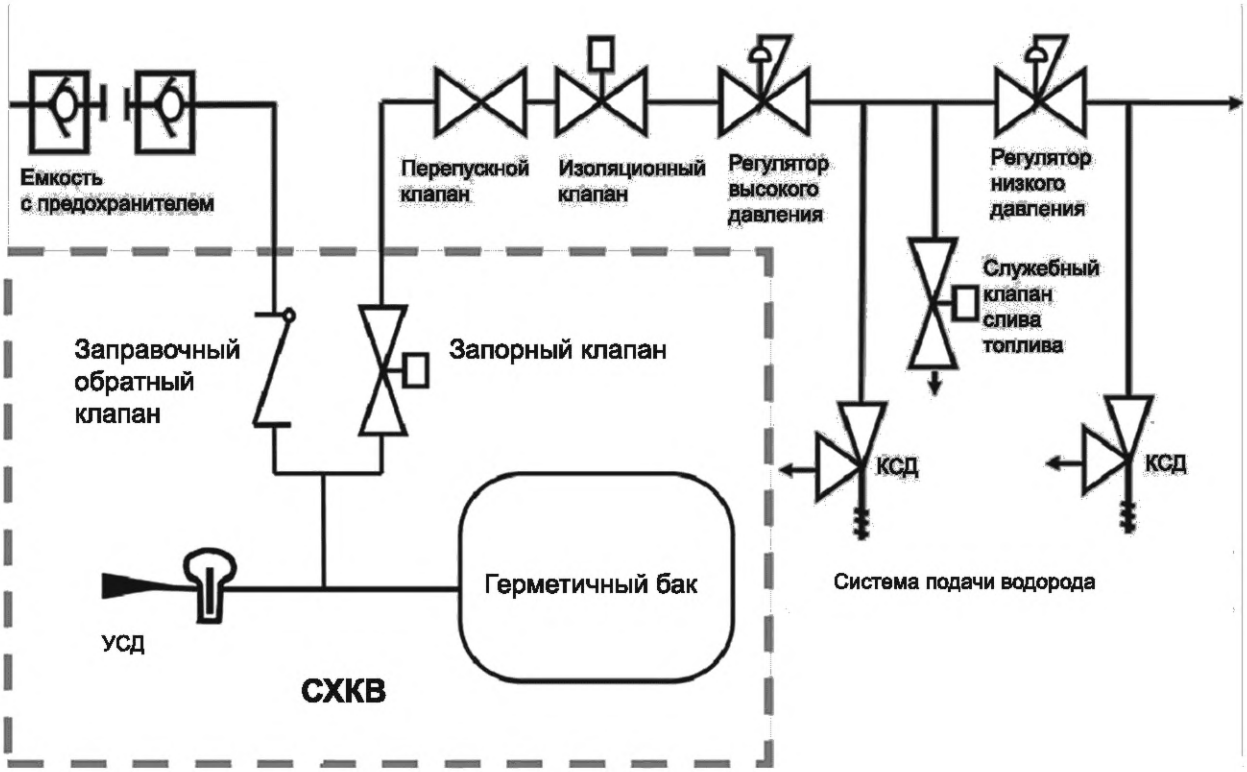
Общие требования к водородным топливным системам, приведенные в разделе 4, применяют к системам хранения сжатого водорода и системам обращения с топливом. В этом разделе приведены дополнительные требования, относящиеся к системам хранения сжатого водорода, рассчитанным на номинальное рабочее давление до 70 МПа.

СХКВ состоит из герметичных сосудов высокого давления, термоактивируемых устройств сброса давления, запорных устройств и всех компонентов, фитингов и топливопроводов между сосудом и этими запорными устройствами, которые изолируют водород высокого давления от остальной части топливной системы и окружающей среды.

Общий вариант топливной системы на сжатом водороде представлен на рисунке 2, где заштрихованная область содержит систему обработки водорода, а СХКВ расположена в незаштрихованной области. Реальные системы хранения сжатого водорода и системы обработки могут отличаться по типу, количеству, конфигурации и расположению функциональных компонентов. Например, в некоторых системах регулятор высокого давления и/или клапаны избыточного давления расположены перед запорным клапаном баллона, что делает эти компоненты частью системы хранения сжатого водорода. Выбор и конфигурация компонентов также могут различаться в зависимости от дизайна конструкции. В целом границы СХКВ определяются возможностью изоляции хранящегося водорода от остальной части топливной системы и окружающей среды. На все компоненты, расположенные в пределах этих границ, распространяются требования, определенные в этом разделе, в то время как на компоненты за пределами границ СХКВ распространяются общие требования, изложенные в разделе 4.

Хранилище сжатого водорода на рисунке 2 характеризуется следующими рабочими условиями:

- во время заправки водород вытекает из сопла на заправочной станции и поступает в часть системы высокого давления через приемник на автомобиле. Затем водород проходит через обратный клапан (или запорный клапан) в баллон, в котором он хранится под высоким давлением;
- водород поступает в двигательную установку из системы хранения сжатого водорода через запорный клапан(ы) баллонов. В случае обнаружения неисправности в двигательной установке системы безопасности ТС обычно вызывают закрытие запорного клапана(ов) баллонов;
- термически активируемые несамовосстанавливающиеся устройства защищают баллоны и систему от взрыва во время внештатных воздействий экстремальных температур (например, при пожаре), высвобождая газообразное содержимое системы.



Примечание — Светлая область — это система хранения сжатого водорода, а темная область — система подачи топлива.

Рисунок 2 — Общий вариант топливной системы на сжатом водороде

В данном разделе преследуют три основные цели:

- определение дорожных требований к обслуживанию системы хранения сжатого водорода, которые необходимо учитывать при их проектировании, чтобы эксплуатация системы хранения водорода

соответствовала всем требованиям и была безопасной на протяжении всего периода эксплуатации автомобиля;

- определение критериев проверочных испытаний для аттестации проектов и минимальных требований к производительности для всех серийных бортовых систем хранения;

- определение минимальных требований для обеспечения соответствия характеристик изделий серийного производства таковым у опытных образцов. На рисунке 3 показана взаимосвязь между требованиями квалификационных критериев при практическом использовании и теоретическими возможностями систем, установленных в ТС.

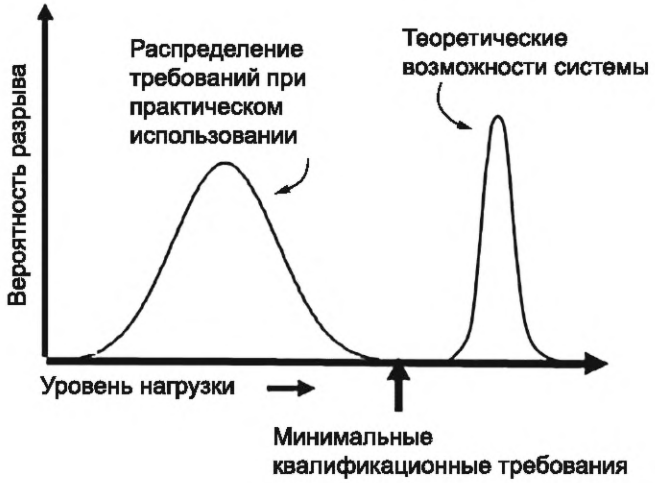


Рисунок 3 — Обоснование минимальных квалификационных требований

Требования к системам хранения сжатого водорода в отношении проектирования, аттестации проектирования и производства приведены в таблице 3. Системы хранения водорода в легковых пассажирских ТС на топливных элементах рассчитаны на нормальное рабочее давление 35 МПа или 70 МПа.

Производители несут ответственность за осуществление контроля качества продукции, чтобы гарантировать, что все производственные единицы соответствуют производственным требованиям, используемым для аттестации проектирования. Как минимум, контроль качества продукции должен включать положения 5.2.3.

Таблица 3 — Применение требований к системе хранения сжатого (компримированного водорода)

Рассмотрение	Структурный элемент	Разработка	Аттестация проекта	Производство
Конструктивные требования	4.1	x		
Общие требования к функциональной безопасности	4.1.1	x		
Опасный материал	4.1.1.1	x		
Автоматическое безопасное отключение подачи топлива	5.2.1.1	x		
Управление воспламеняющимися условиями	4.1.1.4	x		
Защита от избыточного давления	5.2.1.2	x		
Термическая защита (перегрев)	5.2.1.3	x		
Мониторинг неисправностей	4.1.1.7	x		
Условия обслуживания:	4.1.2	x		

Продолжение таблицы 3

Рассмотрение	Структурный элемент	Разработка	Аттестация проекта	Производство
Давление	4.1.2.1	x		
Температура	4.1.2.2	x		
Качество топлива	4.1.2.3	x		
Удар и вибрация	4.1.2.4	x		
Ожидаемый срок службы и увеличенный срок службы	5.2.1.4	x		
Выбор материалов для СХКВ	5.2.1.5	x		
Проверочные испытания для сертификации конструкции	5.2.2	x	x	x
Базовые испытания производительности системы	5.2.2.1	x	x	
Квалификационные испытания долговечности	5.2.2.1.1	x	x	
Давление разрыва нового сосуда	5.2.2.1.2	x	x	
Срок службы нового сосуда	5.2.2.1.3	x	x	
Квалификационные испытания материалов	5.2.2.1.4	x	x	
Ожидаемая проверка эксплуатационных характеристик (пневматика)	5.2.2.2		x	
Проверка эффективности заправки/слива топлива Испытание — циклическое использование газа при экстремальных температурах и температуре окружающей среды	5.2.2.2.1		x	
Характеристики парковки — статическое давление газа. Испытание на проникновение и локальные утечки	5.2.2.2.2		x	
Испытание на контрольное давление (гидравлическое)	5.2.2.2.3		x	
Испытание на остаточную прочность на разрыв	5.2.2.2.4		x	
Долговечность (гидравлическое). Испытание на производительность: экстремальные условия и расширенное использование	5.2.2.3		x	
Испытание на падение (удар)	5.2.2.3.1		x	
Испытание на поверхностное повреждение	5.2.2.3.2		x	
Испытание на химическое воздействие	5.2.2.3.3		x	
Заправка топливом при экстремальном давлении, температуре окружающей среды — циклическое испытание избыточного давления	5.2.2.3.5		x	
Экстремальная долговечность при длительной стоянке. Испытание статическим давлением при высоких температурах	5.2.2.3.6		x	
Заправка топливом при экстремальных температурах экстремально. Испытание циклами температуры/давления	5.2.2.3.7		x	
Испытание на контрольное давление (гидравлическое)	5.2.2.3.8		x	
Испытание на разрыв остаточной прочности	5.2.2.3.9		x	

Окончание таблицы 3

Рассмотрение	Структурный элемент	Разработка	Аттестация проекта	Производство
Производительность в условиях прекращения обслуживания	5.2.2.4		x	
Испытание на локальное воздействие пламени	5.2.2.4.1		x	
Расширенное испытание на огнестойкость	5.2.2.4.2		x	
Испытание на удар с высокой скоростью деформации	5.2.2.4.3		x	
Производительность в условиях прекращения обслуживания	5.2.2.4		x	
Право на аттестацию упрощенного дизайна	5.2.2.5		x	
Сокращение протестированной системы	5.2.2.5.1		x	
Изменение компонентов подсистемы	5.2.2.5.2		x	
Частично подготовленные системы	5.2.2.5.3		x	
Контроль качества производства	5.2.3		x	x
Испытания производственного контроля качества	5.2.3			x
Обычные производственные испытания	5.2.3.1			x
Периодические производственные испытания	5.2.3.2		x	x
Интеграция ТС	4.4			
Этикетки	5.2.4.1			x
Установка и монтаж	5.2.4.2	x		x
Системы нагнетания	5.2.4.3	x		x
Заправка и слив топлива	5.2.4.4	x		x
Руководство или инструкция по эксплуатации	4.4.5	x		x
Аварийное реагирование	4.4.6	x		x
Техническое обслуживание и ремонт автомобилей	5.2.4.5	x		x
Ограничения обслуживания	5.2.4.6	x		
Повторная аттестация для обслуживания после аварии или сбоя	5.2.4.7	x		

5.2.1 Требования к проектированию систем хранения сжатого водорода (см. [3], [4], [5])

5.2.1.1 Автоматическое отключение подачи водорода

В соответствии с 4.1.1 топливную систему следует проектировать таким образом, чтобы перекрывать подачу топлива через предохранительное(ые) устройство(а) при отключении расположенной ниже по потоку двигательной установки или при обнаружении неисправности.

Если используется одно автоматическое запорное устройство, то оно должно находиться как можно ближе к выходному отверстию баллона.

Если два автоматических запорных клапана используются последовательно, то первый автоматический запорный клапан необходимо располагать внутри или рядом с баллоном. В системах с несколькими баллонами каждый баллон должен быть оборудован автоматическим запорным клапаном, либо конструкция должна обеспечивать общую безопасность. Вторичный последовательный автоматический запорный клапан может быть расположен в последующих системах.

Автоматические запорные клапаны должны соответствовать общим требованиям, определенным в разделе 4, включая требования к долговечности в соответствии с перечислением а) 4.1.2.5. Первич-

ный (или единственный) автоматический запорный клапан должен удовлетворять применяемым стандартам проверки производительности (аттестации конструкции), а также должен быть оценен и признан приемлемым в рамках квалификационных испытаний системы хранения сжатого водорода в 5.2.2.

5.2.1.2 Защита от избыточного давления

Системы необходимо проектировать таким образом, чтобы выдерживать без взрыва:

а) неисправность заправочной станции, вызывающую избыточное давление.

Защита от избыточного давления на заправочной станции требует, чтобы заправка ТС соответствовала установленным требованиям ГОСТ Р 70682 (см. также [1], [2]), которые гарантируют, что соединение ограничено ТРК, подающей топливо только ниже максимально допустимого давления заправки.

Требования к эксплуатационным испытаниям, установленные в 5.2.2, предназначены для проверки способности систем хранения обеспечить надлежащую работу, если риск избыточного давления управляется на заправочной станции с функциональными возможностями, которые не обеспечивают большей вероятности избыточного давления в СХКВ.

Заправочная станция должна обеспечивать защиту от переполнения во время заправки. Заправку следует прекращать максимум при 1,25×НРД (или меньше, в зависимости от температуры окружающей среды и начального давления). Ожидается, что управление неисправностями на заправочной колонке вызывает от 125 % до 138 % НРД. Если давление в ТРК повышается до 1,38×НРД, предохранительный клапан заправочной станции должен сработать и ограничить давление до уровня не выше 1,5×НРД. Ожидается, что на заправочной станции будет обеспечено соответствующее резервирование в этой защите. Эти требования необходимо воплощать в стандартах ТРК для заправки сжатым водородом и включать в типовые строительные нормы и правила для заправочных станций.

Если во время заправки возникает избыточное давление 1,38×НРД, ожидается, что заправочные станции предотвратят дальнейшее использование ТРК до тех пор, пока не будет выявлен и устранен источник избыточного давления.

Заправочные станции должны быть защищены в соответствии с нормами, указанными в ГОСТ Р 70682 (также см. [2]). К ним относятся разрывные шланги для перекрытия подачи топлива в случае, если ТС отъезжает от колонки во время заправки; и соответствующие поверхности проезжей части для заземления ТС через шины во время заправки;

б) отказ автоматических или самоактивирующихся клапанов (таких как электромагнитные запорные клапаны, обратные клапаны, переливные клапаны) в системах хранения сжатого водорода.

Отказы автоматических и самоактивирующихся клапанов в системах с несколькими сосудами могут привести к переполнению и последующему избыточному давлению при экстремальных колебаниях температуры. Если существует вероятность такого отказа, необходимо установить следующие контрмеры:

1) предусмотреть метод обнаружения отказов в соответствии с 4.1.1.7;

2) процедуры заправки топлива должны распознавать потенциальный вид отказа и позволять слить топливо и отремонтировать систему (см. 5.2.4.4);

в) пожар, вызывающий потерю структурной целостности конструкции или вызывающий избыточное давление из-за нагрева хранящихся газов.

Активирующую часть клапана сброса давления следует располагать в системе хранения сжатого водорода для защиты от разрушений в случае пожара (см. 5.2.1.3).

С учетом средств защиты от избыточного давления все вероятные отказы от избыточного давления в СХКВ контролируются, а устройства сброса давления не требуются в СХКВ и не должны использоваться.

5.2.1.3 Термозащита

Системы хранения должны быть рассчитаны на температуру окружающей среды и рабочую температуру, как указано в 4.1.2.2, с учетом температур, возникающих при сливе топлива (нормальная эксплуатация и обслуживание ТС в соответствии с указаниями изготовителя ТС) и во время заправки топливом.

Баллоны необходимо проектировать так, чтобы они были защищены термоактивируемыми устройствами сброса давления, которые не закрываются повторно после срабатывания (см. приложение Г). Термоактивируемые устройства сброса давления должны быть расположены в отсеке, в котором размещаются СХКВ, таким образом, чтобы они сработали до того, как баллон или другие компоненты взорвутся (см. 5.2.2.4.1 и 5.2.2.4.2).

5.2.1.4 Ожидаемый срок службы и увеличенный срок службы

СХКВ следует проектировать так, чтобы обеспечивать приемлемую утечку/просачивание без взрывов в течение всего срока службы ТС.

5.2.1.5 Выбор материалов для систем хранения сжатого водорода

Общее руководство по выбору материалов, совместимых с водородом, а также руководство по аттестации материалов, используемых в конструкции сосудов высокого давления, приведено в приложении А.

Испытания на прочность и долговечность определены в приложении Д для аттестации полимерных и прочих облицовочных материалов и металлов, используемых в конструкции баллонов.

Производители компонентов СХКВ должны вести протоколы и отчеты испытаний, подтверждающие соответствие материалов приведенным требованиям.

5.2.2 Испытание на проверку производительности для аттестации проекта

СХКВ, используемые в дорожных ТС, следует квалифицировать для эксплуатации в дорожных ТС в соответствии с требованиями к характеристикам материала, указанными в 5.2.1.5, и в соответствии с требованиями к рабочим характеристикам, указанными в 5.2.2.1—5.2.2.4.

Все трубопроводы и критические запорные компоненты, такие как запорные клапаны, клапаны сброса давления и обратный(е) клапан(ы) внутри СХКВ (как определено в 5.2), должны удовлетворять применяемым стандартам проверки рабочих характеристик (аттестации) (см. приложение Г).

Проверочные испытания предназначены для оценки базовой производительности системы (см. 5.2.2.1), производительности системы в ожидаемых условиях эксплуатации (см. 5.2.2.2), долговечности сосудов хранения в суровых условиях и при длительном использовании (см. 5.2.2.3) и отсутствия взрывов при эксплуатации и в условиях прекращения обслуживания (см. 5.2.2.4). Испытательные центры могут счесть целесообразным провести гидравлические испытания в качестве предварительной проверки целостности конструкции перед началом работ (см. 5.2.2.2). Измененные требования к частично прошедшим предварительную аттестацию системам определены в 5.2.2.5.

По усмотрению производителя баллонов размеры выборки для проверки работоспособности могут быть больше, чем предписано в 5.2 и упомянутых приложениях, однако в этом случае для расчетов и определений должны использоваться все полученные в ходе этих испытаний данные.

Системы хранения сжатого водорода, сертифицированные для эксплуатации на дорогах в соответствии с 5.2, необходимо изготавливать в условиях серийного производства в соответствии с 5.2.3. Перед выполнением проверочных испытаний должно быть установлено количество циклов испытаний, которые должны быть проведены в соответствии с 5.2.2.1, 5.2.2.2 и 5.2.2.3.

Для систем хранения, предназначенных для использования в легковых ТС, циклы испытаний должны быть следующими:

- количество циклов испытаний на ожидаемую работу в 5.2.2.2 равно 500, N_E;
- количество циклов испытаний на долговечность в 5.2.2.1, равно 5500, N_D;
- количество циклов испытаний на давление при температуре окружающей среды, указанное в 5.2.2.3, равно 3300, N_H;
- количество циклов испытаний на давление при экстремальных температурах, указанное в 5.2.2.3, равно 2200, M_H.

Для систем хранения, предназначенных для использования в коммерческих ТС с тяжелыми условиями эксплуатации, таких как грузовики и автобусы, количество циклов испытаний должно быть следующим:

- количество циклов испытаний на ожидаемую работу в 5.2.2.2, равно 1000, N_E;
- количество циклов испытаний на долговечность в 5.2.2.1, равно 15000, N_D;
- количество циклов испытаний на давление при температуре окружающей среды в 5.2.2.3, равно 9000, N_H;
- количество циклов испытаний на давление при экстремальных температурах в 5.2.2.3, равно 6000, M_H.

Обоснование требований к испытаниям по 5.2.2 приведено в приложении В, а требования к квалификационным испытаниям приведены в приложении Б.

5.2.2.1 Базовые испытания производительности системы

Эти испытания предназначены для того, чтобы:

- обеспечить базовые характеристики сосудов для использования в аттестации конструкции (см. 5.2.2.2.4 и 5.2.2.3.9);

- обеспечить уверенность в том, что сосуды, представленные для аттестационных испытаний конструкции, сравнимы по своим свойствам;

- предоставить исходные данные, используемые для подтверждения того, что изготовленные системы аналогичны системам, используемым для получения права на эксплуатацию на дорогах в соответствии с требованиями к испытаниям 5.2.2.

5.2.2.1.1 Квалификационные испытания долговечности

а) Совместимость с водородом

Изготовитель должен убедиться, что срок службы системы хранения водорода не снижается из-за химической активности газообразного водорода (см. приложение А). Производителям или поставщикам баллонов (или их представителям) необходимо вести протоколы испытаний и проверять соответствие металлических сплавов проектным спецификациям.

б) Сопротивление разрыву под давлением

Изготовитель должен убедиться в том, что при продолжительной эксплуатации баллон не подвержен разрыву под давлением (см. Ж.1). Изготовители должны задокументировать спецификации материалов и конструкции, а также результаты испытаний, подтверждающие полученное в результате минимальное допустимое давление разрыва, требуемое для надлежащего сопротивления разрыву под нагрузкой.

5.2.2.1.2 Давление разрыва нового баллона

а) Изготовителю следует определить среднее давление разрыва новых баллонов таким образом, чтобы минимально допустимое значение для последующего производства было равно или выше минимально допустимого давления разрыва, как установлено в перечислении б) 5.2.2.1.1.

б) Среднее давление разрыва баллона BP_{DQ} проверяют в ходе квалификационных испытаний конструкции путем создания гидравлического давления и разрыва трех случайно выбранных новых сосудов из партии для квалификационных испытаний, состоящей не менее чем из десяти сосудов. Все три испытанных баллона должны иметь разрывное давление в пределах ± 10 % от BP_{DQ} (см. Б.3).

5.2.2.1.3 Срок службы нового баллона

Производитель определяет и документирует номинальный срок службы цикла давления баллона (далее — НССЦД).

Репрезентативность баллонов, представленных на квалификационную оценку конструкции, должна быть проверена путем цикличного гидравлического испытания трех случайно выбранных новых баллонов из партии для квалификационных испытаний, состоящей не менее чем из десяти баллонов, в соответствии с процедурой испытаний, описанной в Б.4. Каждый баллон подвергается циклическому изменению давления до 1,25 × НРД при температуре окружающей среды (20 ± 5) °С без утечек; минимальное количество циклов испытаний на долговечность установлено в 5.2.2.

Срок службы при циклическом изменении давления каждого баллона определяют путем продолжения циклического воздействия давления на каждый баллон до тех пор, пока не произойдет утечка или не будет проведено 2 цикла испытаний на долговечность без перерыва.

Если ЦДУ каждого сосуда не находится в пределах ±25 % от НССЦД или если количество циклов давления каждого сосуда равно N_D без утечек, то три сосуда должны пройти гидравлические испытания на долговечность по 5.2.2.3.

Если ЦДУ каждого баллона находится в пределах ±25 % от номинального количества, то один баллон должен пройти испытание в соответствии с 5.2.2.3.

5.2.2.1.4 Квалификационные испытания материалов

Результаты квалификационных испытаний материалов (включая информацию, приведенную в 5.2.1.5) следует использовать для установления базовых уровней соответствия производства.

5.2.2.2 Испытание (пневматическое) на ожидаемую эксплуатацию

Минимум одна система хранения водорода должна продемонстрировать способность функционировать при ожидаемом комплексе воздействий, связанном с наихудшими условиями заправки и выгрузки топлива (циклическое изменение давления в пределах температуры окружающей среды) и его хранения (статическое воздействие давления). Воздействие в реальных условиях требует способности выдерживать перемежающиеся события парковки и заправки топливом, связанные с циклическим изменением давления с насыщением материалов водородом и без него, а также устойчивостью к разрушению под напряжением после циклической усталости.

Система хранения, прошедшая производственные испытания согласно 5.2.3.1, продемонстрирует требуемую производительность в следующей заданной последовательности, как показано на рисунке 4:

- характеристики заправки/слива топлива — испытание на цикличный газообмен при экстремальных температурах и температуре окружающей среды (см. перечисление а) 5.2.2.2.1);
- парковочные показатели — испытание на утечку и проникновение газа под статическим давлением (см. 5.2.2.2.2);
- характеристики заправки/слива топлива — испытание на цикличный газообмен при экстремальных температурах и температуре окружающей среды (см. перечисление б) 5.2.2.2.1);
- парковочные показатели — испытания на утечку и проникновение газа под статическим давлением (см. 5.2.2.2.2);
- испытание на герметичность при 180 % НРД (см. 5.2.2.2.3);
- гидравлическое испытание на разрыв (см. 5.2.2.2.4).

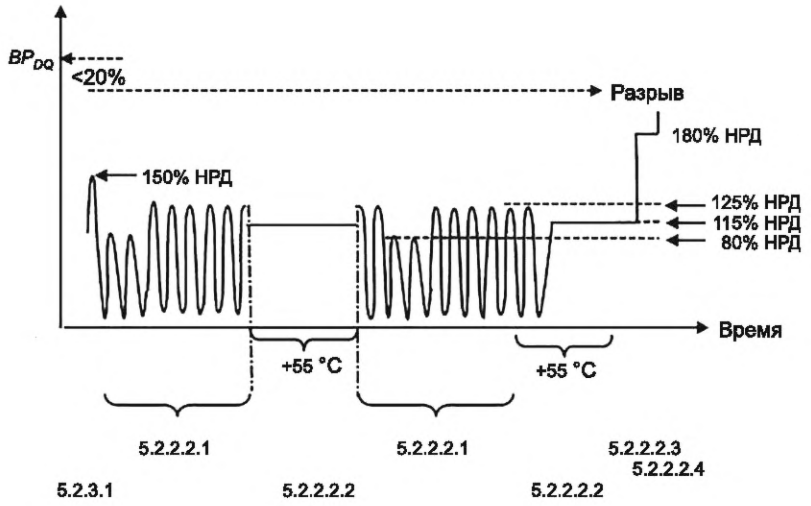


Рисунок 4 — Проверка ожидаемых эксплуатационных характеристик хранилища компримированного водорода

5.2.2.2.1 Проверочные испытания характеристик заправки/слива топлива — цикличный газообмен при экстремальных температурах и температуре окружающей среды

Система хранения водорода должна демонстрировать полную работоспособность после воздействия циклов заправки/слива топлива газообразным водородом под давлением от 2 МПа до не менее максимального заданного давления (см. Б.5). Требуемое количество циклов испытаний N_E установлено в 5.2.2.

Циклы пневматических испытаний необходимо выполнять с газообразным водородом следующим образом:

а) половину ожидаемых циклов испытаний заправки/слива топлива (50 % N_E) проводят перед первым испытанием на утечку и проницаемость газа при статическом давлении (см. подпункт 5.2.2.2.2), как показано на рисунке 4.

1) первые 5 % циклов проводят при давлениях от 2 МПа до 1,00 × НРД во внешней среде при устойчивой температуре не более минус 40 °С. Первые 10 циклов должны быть проведены со стабилизированной в начале каждого цикла системой при более 0,80 × НРД (соответствует 1,00 × НРД при 15 °С). Топливо с температурой не менее плюс 20 °С должно использоваться для заправки в течение первых 5 сбалансированных циклов. Топливо при температуре не более минус 35 °С должно использоваться для заправки топливом в следующих 5 сбалансированных циклах и для заправки оставшихся несбалансированных циклов в окружающей среде не более 40 °С.

2) Следующие 5 % циклов N_E проводят при давлениях не более 2 МПа до давлений свыше 1,25 × НРД во внешней среде при устойчивой температуре более плюс 50 °С и относительной влажности не менее 95 %. Первые 5 циклов необходимо проводить с системой, сбалансированной при давлениях не более 2 МПа в начале каждого цикла. Топливо с температурой не более минус 35 °С должно использоваться для заправки в 5 уравновешенных циклах (и для заправки в остальных циклах, которые не уравновешены).

3) Следующие 40 % циклов N_E должны проводиться при давлениях не более 2 МПа до давлений более 1,25 × НРД во внешней среде, стабилизированной на уровне от 15 °С до 25 °С, и система уравновешена при не менее номинальной плотности полного заполнения (соответствует 1,00 × НРД при 15 °С) в начале первого цикла. Для заправки следует использовать топливо с температурой не более минус 35 °С. Первые 50 циклов проводят со скоростью слива топлива, установленной изготовителем ТС для слива топлива при техническом обслуживании (сервисе), если эта скорость превышает скорость слива топлива при эксплуатации ТС с максимальной загрузкой;

б) половину испытательных циклов заправки/слива топлива в ожидаемых условиях эксплуатации (50% N_E) проводят после первого испытания на утечку и проникновение газа при статическом давлении (см. 5.2.2.2.2), как показано на рисунке 4. Для заправки следует использовать топливо при температуре не более 35 °С.

1) Следующие 5 % циклов N_E проводят при давлениях не более 2 МПа до давлений более 1,25 × НРД во внешней среде, стабилизированной при температуре плюс 50 °С и относительной влажности 95 %. Система должна быть уравновешена при давлениях не более 2 МПа в начале первого цикла.

2) Следующие 5 % циклов N_E проводят при давлениях не более 2 МПа до 1,00 × НРД во внешней среде, стабилизированной при температуре не более минус 40 °С. Система должна быть уравновешена при давлениях 0,80 НРД (соответствует 1,00 × НРД при 15 °С) в начале первого цикла.

3) Последние 40 % N_E проводят при давлениях не более 2 МПа до 1,25 × НРД во внешней среде, стабилизированной на уровне от 15 °С до 25 °С. Система должна быть уравновешена не ниже номинальной плотности полного заполнения (соответствующей 1,00 × НРД при 15 °С) в начале первого цикла.

5.2.2.2.2 Характеристики парковки — испытания на просачивание и локальные утечки при статическом давлении газа

Система хранения водорода должна демонстрировать полную работоспособность, отсутствие неприемлемых утечек и просачивания после длительного воздействия газообразного водорода при максимальном статическом давлении полного заполнения. Системы хранения водорода должны находиться под давлением газообразного водорода до 1,15 × НРД и выдерживаться при температуре более плюс 55 °С в течение не менее 30 часов для первой выдержки и до тех пор, пока скорость проникновения и утечки не достигнет установившегося состояния при второй выдержке (см. Б.6).

Максимально допустимый сброс из системы хранения компримированного водорода для легковых ТС составляет А × 150 см^3/мин, где А = (ширина ТС+1) × (высота ТС+0,5) × (длина ТС+1) / 30,4. В качестве альтернативы, как описано в приложении В, если общий объем воды в системе хранения меньше 330 л, тогда система может быть квалифицирована для 46 мл/л/ч газообразного водорода при температуре 55 °С и 1,15 × НРД.

По завершении каждой выдержки необходимо провести испытание на локальные утечки в соответствии с Б.7, чтобы подтвердить, что локализованная утечка, если таковая имеется, не способна поддерживать пламя. Максимально допустимая локальная утечка составляет 0,005 мг/с (приблизительно 3,6 см^3/мин).

5.2.2.2.3 Испытание пробным давлением (гидравлическое)

Это испытание может быть проведено на всей СХКВ или только на баллонах по усмотрению изготовителя или интегратора системы. Испытуемое изделие следует подвергнуть гидравлическому давлению до 1,80 × НРД и выдержать в течение 4 мин без разрыва (см. Б.1).

5.2.2.2.4 Испытание на разрыв (гидравлическое)

Баллоны должны подвергаться гидравлическим испытаниям на разрыв для подтверждения того, что разрывное давление находится в пределах 20 % от среднего давления разрыва баллона BP_{DQ}, как определено в 5.2.2.1.2 (см. Б.3).

5.2.2.3 Эксплуатационные испытания на долговечность (гидравлические)

Система хранения водорода должна иметь достаточную надежность, чтобы безотказно выдерживать воздействие экстремальных условий и долговременную эксплуатацию. По крайней мере один баллон из аттестационной партии, прошедший стандартные заводские испытания (как описано в 5.2.3.1), должен выдержать без разрыва или утечки воздействие неблагоприятных условий окружающей среды и эксплуатацию сверх ожидаемого срока службы. Баллон должен продемонстрировать требуемую долговечность после серии следующих воздействий:

- испытания на удар (см. 5.2.2.3.1);
- испытания на повреждение поверхности (см. 5.2.2.3.2);

- испытания на химическое воздействие (см. 5.2.2.3.3);
- заправки топливом в экстремальных условиях — циклического испытания давлением при температуре окружающей среды (см. 5.2.2.3.4);
- заправки топливом при экстремальном давлении — циклического испытания на избыточное давление при температуре окружающей среды (см. 5.2.2.3.5);
- экстремальной долговечности при парковке — испытании высокой температурой и статическим давлением (см. 5.2.2.3.6);
- заправки топливом при экстремальных температурах;
- испытания циклическим давлением при экстремальных температурах (см. 5.2.2.3.7);
- испытания пробным давлением при 180 % НРД (см. 5.2.2.3.8);
- испытания на разрыв и остаточную прочность (см. 5.2.2.3.9).

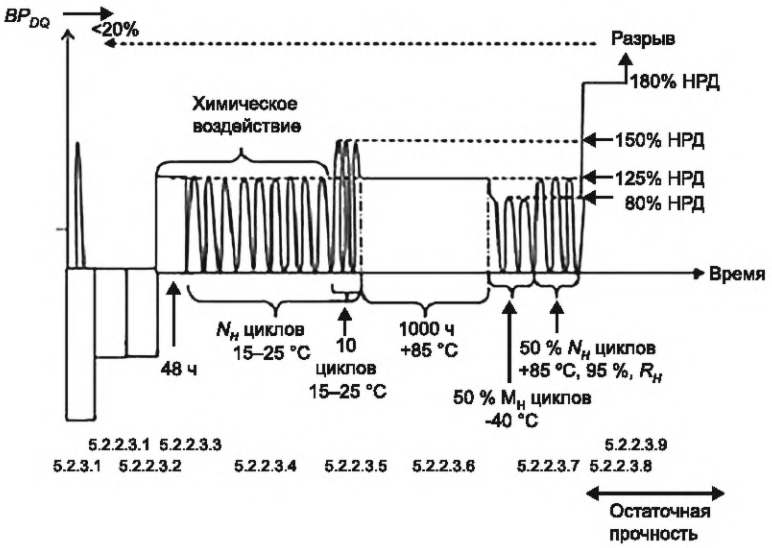


Рисунок 5 — Проверка характеристик долговечности баллонов (проектная аттестация)

5.2.2.3.1 Испытание на удар

Испытание предназначено для подтверждения способности баллона выдерживать удары при падении перед его установкой, если на системе нет постоянных маркеров, фиксирующих подверженность сопоставимым ударам и означающих, что установка не разрешена. Процедуры испытаний — согласно Б.8.

5.2.2.3.2 Испытание на повреждение поверхности

Испытание предназначено для демонстрации того, что баллон способен выдерживать износ, вызванный креплениями ТС. Процедуры испытаний — согласно Б.9.

5.2.2.3.3 Испытание на химическое воздействие

Испытание предназначено для демонстрации того, что баллон способен выдерживать химические воздействия окружающей среды, усиленные предварительным повреждением поверхности. Химическое воздействие должно осуществляться в течение 48 часов при статическом давлении 1,25 × НРД с последующим испытанием на заправку топливом в экстремальных условиях (см. 5.2.2.3.4). Процедуры испытаний — согласно Б.4 и Б.10.

5.2.2.3.4 Заправка топливом в экстремальных условиях — испытание циклами изменения давления при температуре окружающей среды

Баллон должен продемонстрировать долговечность (устойчивость к недопустимым утечкам и разрывам) после воздействия циклов изменения давления до 1,25 × НРД. Требуемое количество циклов при температуре окружающей среды N_H установлено в 5.2.2. Испытания на долговечность следует проводить при температуре окружающей среды от 15 °C до 25 °C. Химическое воздействие (см. 5.2.2.3.3) должно сохраняться в течение циклов давления и прекращаться после завершения этих циклов. Во время циклического изменения давления в системах не должно быть признаков разрыва, непреднамеренного выброса или физического износа. Процедуры испытаний — согласно Б.4.

5.2.2.3.5 Заправка топливом при критическом давлении — циклическое испытание избыточным давлением при температуре окружающей среды

Неободимо провести десять циклов давления до 1,50 × НРД при температуре от 15 °С до 25 °С, чтобы продемонстрировать способность баллона выдерживать избыточное давление во время отказа заправочной станции в конце срока службы. Процедуры испытаний — согласно Б.4.

5.2.2.3.6 Предельная долговечность при парковке — испытание статическим давлением при высокой температуре

Баллон следует выдерживать при внешней температуре плюс 85 °С в течение 1000 часов. Баллоны, аттестуемые для легковых личных ТС (согласно 5.2.2), должны находиться под давлением до 1,25 × НРД, а для коммерческих ТС с тяжелыми условиями эксплуатации (согласно 5.2.2) должны подвергаться давлению 1,35 × НРД. Процедуры испытаний — согласно Б.11.

5.2.2.3.7 Заправка топливом при критических температурах — циклическое испытание при экстремальных температурах/давлениях

Баллон должен демонстрировать долговечность (устойчивость к недопустимым утечкам и разрывам) после длительной заправки топливом в условиях экстремальных температур окружающей среды. Требуемое количество циклов давления M_H при экстремальных температурах определено в 5.2.2. Половину этих циклов давления (50 % M_H) проводят при температуре окружающей атмосферы и среды не более минус 40 °С и циклах давления до 0,80 × НРД; оставшуюся половину циклов проводят при температуре не менее плюс 85 °С и относительной влажности не менее 95 % с циклами давления не менее 1,25 × НРД. Процедуры испытаний — согласно Б.4.

5.2.2.3.8 Испытание пробным давлением (гидравлическое)

Баллон должен находиться под гидравлическим давлением при температуре окружающей среды не менее 1,80 × НРД и выдерживаться без разрыва в течение 4 минут. Процедуры испытаний — согласно Б.1.

5.2.2.3.9 Испытание на остаточную прочность (гидравлическое)

Баллон проходит (гидравлическое) испытание давлением на разрыв при температуре окружающей среды, чтобы убедиться, что давление на разрыв находится в пределах 20 % от среднего давления на разрыв нового сосуда BP_{DQ}, как определено в 5.2.2.1.2. Процедуры испытаний — согласно Б.3.

5.2.2.4 Производительность в условиях прекращения обслуживания

Системы хранения должны демонстрировать устойчивость к повреждению в результате критических воздействий, прекращающих эксплуатацию.

5.2.2.4.1 Испытание на локальное воздействие пламени

Система хранения находится под давлением НРД и подвергаться локальному воздействию пламени. Устройство сброса давления, активируемое температурой, должно выпускать содержащиеся в нем газы контролируемым образом и не закрываться повторно. При проведении испытания не должен произойти взрыв. Процедуры испытаний — согласно Б.12.

Примечание — Для испытания системы над первичным (локальным) источником возгорания для легковых автомобилей должен использоваться любой из следующих двух методов. Метод 2 рекомендуется в случае тяжелых условий эксплуатации оборудования из-за сложности различных конфигураций ТС. Кроме того, необходимо изучить потенциальное воздействие пожара в ТС большой грузоподъемности, поскольку продолжительность и уровни температуры во время огневого испытания, возможно, потребуется увеличить (помимо уровней, указанных в Б.12), чтобы учесть пожары в больших грузовых (или грузовых) помещениях или разбрызгивание легковоспламеняющихся сред (например, из гидравлических систем).

5.2.2.4.2 Расширенное испытание на огнестойкость

Система хранения должна находиться под давлением НРД и подвергаться длительному воздействию огня, охватывающего все изделие. (см. описание процедуры испытания в Б.13.) Устройство сброса давления, активируемое температурой, должно выпускать содержащиеся в нем газы контролируемым образом и не закрываться повторно. При проведении испытания не должен произойти взрыв. Процедуры испытаний — согласно Б.13.

5.2.2.4.3 Испытание на удар с высокой скоростью деформации

Система хранения находится под давлением НРД и подвергается ударам без разрушения. Процедуры испытаний — согласно Б.14.

5.2.2.5 Условия приемлемости упрощенной процедуры аттестации проекта

Системные испытания характеристик изделий, определенные в 5.2.2.1—5.2.2.3, весьма обширны. При определенных условиях можно определить альтернативы, которые могут упростить и ускорить про-

цесс аттестации проекта без ущерба для результатов. Такие альтернативы допустимы, как определено ниже, если они поддерживаются оценкой рисков в соответствии с 4.1.1, которая определяет и устраняет потенциальные проблемы, связанные с этими изменениями.

5.2.2.5.1 Сокращение количества объектов в системе, подлежащих испытанию

Система хранения компримированного водорода в ТС может содержать более одной законченной, функционально независимой системы хранения компримированного водорода, как определено в 5.2 и показано на рисунке 2. Испытания для проверки работоспособности (аттестации проекта) могут выполняться отдельно для каждой независимой законченной системы при условии, что результаты подтверждают квалификацию всей системы. Требование к просачиванию/утечкам в 5.2.2.2.2 применяется к сумме утечек для всех систем ТС.

СХКВ с несколькими баллонами показана на рисунке 6. Четыре секции (номера 1, 2, 4 и 5) имеют уникальные конфигурации компонентов и/или трубопроводов и, следовательно, должны проходить проверочные испытания по отдельности. Система 3 состоит из двух идентичных систем в отношении компонентов и конфигураций трубопроводов; следовательно, пройти проверку производительности должна только одна из систем под номером 3.

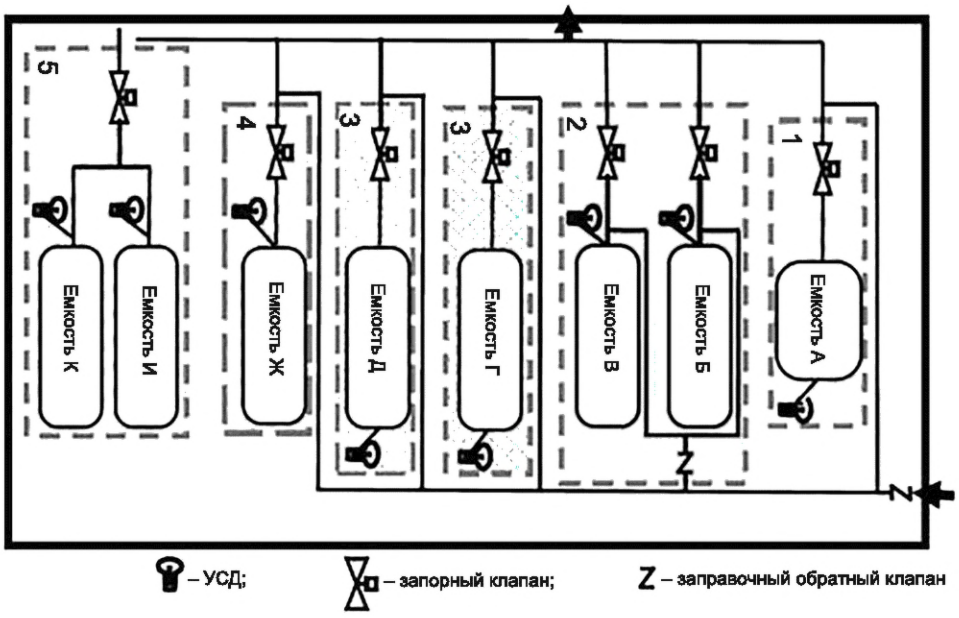


Рисунок 6 — Пример системы хранения с повторяющимися и неповторяющимися элементами

5.2.2.5.2 Изменения компонентов подсистемы

Проект и конструкция системы хранения не должны проходить повторную аттестацию, если компоненты подсистемы, использовавшиеся при предыдущей проверке рабочих характеристик (в соответствии с 5.2.2.1—5.2.2.3), заменяются компонентами с сопоставимыми функциями, креплениями и размерами. Все компоненты трубопроводов и первичных запорных устройств, которые определяют границы локализации системы хранения (например, запорный клапан, ТУСД и обратный клапан, как показано на рисунке 2) должны соответствовать тому же стандарту, что и компонент, используемый в исходной проверке работоспособности (аттестация проекта) системы хранения водорода для одного и того же применения в системе хранения водорода.

Любое изменение аппаратуры ТУСД, его положения установки и/или вентиляционных линий требует повторной аттестации в соответствии с 5.2.2.4.

5.2.2.5.3 Частичное освобождение систем от испытаний

Все системы хранения соответствуют требованиям к производительности, указанным в 5.2.2.1—5.2.2.4. В этом разделе представлены упрощенные средства аттестации проекта (проверки производительности) для новых систем хранения, которые аналогичны ранее проверенным системам хранения. Системы хранения, соответствующие перечисленным ниже критериям, могут претендовать на дорож-

ную эксплуатацию с использованием перечисленных испытаний в качестве альтернативы полным требованиям 5.2.2.1—5.2.2.4.

Системы хранения, отвечающие следующим критериям, могут пропустить 5.2.2.2 (испытание (пневматическое) на ожидаемую эксплуатацию) и могут удовлетворять квалификационным требованиям при использовании только 5.2.2.1—5.2.2.4.

а) Изменение только длины баллона для хранения менее чем на 50 % или его диаметра менее чем на 20 %, при этом толщина также изменяется, по крайней мере, пропорционально диаметру.

Системы хранения, отвечающие следующим критериям, могут не проходить испытание по 5.2.2.3 (испытание на долговечность (гидравлические характеристики)) и могут удовлетворять проектным требованиям только по 5.2.2.1, 5.2.2.2 и 5.2.2.4.

б) Изменение только неметаллического материала облицовки и/или его обработки

Системы хранения, отвечающие следующим критериям, могут не проходить испытания 5.2.2.2 (испытание (пневматическое) на ожидаемую эксплуатацию) и 5.2.2.3 (испытание долговечности (гидравлическое) характеристик) и могут удовлетворять квалификационным требованиям, используя только 5.2.2.4.

в) Изменения только в компонентах ТС, не включенных в СХКВ, определенные в 5.2, которые влияют на результаты испытаний на огнестойкость и/или были включены в предыдущую аттестацию проекта в соответствии с 5.2.2.4.

Системы хранения, отвечающие следующим критериям, могут не проходить испытания 5.2.2.2 (пневматическое испытание при ожидаемой эксплуатации) и 5.2.2.3 (гидравлическое испытание характеристик долговечности) и могут удовлетворять квалификационным требованиям, используя только 5.2.2.4.

а) Изменения только ТУСД без соответствующего изменения их количества или конфигурации установки.

б) Изменение любого металлического материала, используемого в системе хранения сжатого водорода, требует повторной проверки конструкции в соответствии с 5.2.2.1—5.2.2.4.

Изменение системы, которое соответствует требованиям альтернативного тестирования в соответствии с 5.2.2.4.2, не может использоваться в качестве основы для второго (последующего) изменения системы, чтобы соответствовать альтернативному тестированию в соответствии с 5.2.2.4.2.

5.2.3 Испытания системы контроля качества продукции

Общие требования к системам контроля качества продукции и проверки процессов приведены в 4.3. Изготовители должны задокументировать выбор и диапазон параметров производственного контроля, размер партии или серии (если они используются), а также содержание и частоту производственных испытаний и инспекций, чтобы убедиться, что все производственные единицы соответствуют требованиям квалификационных испытаний конструкции по 5.2.2.

5.2.3.1 Регулярные производственные испытания (на каждой произведенной единице)

Оборудование должно пройти проверку на соответствие требованиям к характеристикам, приведенным в 4.3, со следующими изменениями:

- обычные контрольные испытания под давлением в соответствии с 4.3 следует проводить на баллонах при давлении до 1,50 × НРД (в соответствии с Б.1 для руководства или применяемых стандартов на компоненты). Проверки размеров во время контрольного испытания под давлением должны установить, что производство статистически соответствует характеристикам единиц, используемых при проверке рабочих характеристик (аттестации конструкции).

Для всех трубопроводов и затворов (например, запорных клапанов, ТУСД и обратных клапанов) необходимо проводить плановые испытания контроля качества продукции:

а) регулярные испытания на герметичность узлов высокого давления должны проводиться в условиях, указанных изготовителем (см. Б.2 и Б.7);

б) соответствующие испытания для производственного контроля качества продукции (см. следующие примеры проверок и испытаний для производителей и установщиков сосудов хранения):

1) для металлических баллонов и лейнеров: испытания на твердость после окончательной термообработки для подтверждения того, что твердость находится в расчетном диапазоне;

2) проверка сварных лейнеров из нержавеющей стали и лейнеров из алюминиевого сплава;

3) проверка предусмотренной проектом отделки поверхности, включая сгибы на горловинах или торцевых выступах и проемах;

4) неразрушающий контроль для проверки того, что размеры дефектов баллона меньше таковых в проектных спецификациях. Метод неразрушающего контроля должен быть способен обнаруживать максимально допустимый размер дефекта.

Примечание — Компоненты, обеспечивающие функции закрытия, такие как запорный клапан баллона, обратный клапан, ТУСД и вентиляционный канал, должны соответствовать требованиям производственного контроля качества (см. приложение Г).

5.2.3.2 Периодические производственные испытания

Порядок периодических испытаний должен быть разработан в соответствии с протоколом контроля качества производителя и 4.3.

Для контроля качества производства изготовителем устанавливается и документируется частота периодических испытаний баллонов. Начальная (по умолчанию) частота отбора проб не должна превышать 200 единиц (плюс единицы разрушающего контроля) или одной производственной смены, в зависимости от того, что больше. Если все периодические испытания выполняют пять раз подряд, то частота периодических испытаний по умолчанию может быть увеличена до 2000 единиц или десяти производственных смен. Периодические испытания баллонов включают:

- испытание на разрывное давление для подтверждения того, что разрывное давление больше, чем BP_{min}, где BP_{min} установлено в перечислении б) 5.2.2.1.1, а среднее из последних 10 испытаний должно быть больше, чем 90 % BP_{DQ};
- испытание циклом давления до 1,25 × НРД при температуре окружающей среды в соответствии с процедурой испытания в Б.4 для подтверждения отсутствия утечек и разрывов в течение циклов испытаний N_D, минимальное количество циклов испытаний на долговечность, как установлено в 5.2.2. Затем на том же сосуде проводится контрольное испытание под давлением до 1,80 × НРД в течение не менее 4 мин, чтобы установить дополнительную устойчивость к разрыву под действием статического давления;
- испытания материалов, используемых в образцах партии, которые должны показать соответствие проектным требованиям. Например, см. приложения А и Д.

Если сосуд не соответствует требованиям, определенным выше, то следует определить и подтвердить источник дефекта, а затем всю подозрительную продукцию следует отклонить как непригодную для использования в ТС. Остаток партии, которая считается приемлемой, должен быть повторно отобран и испытан в соответствии с 5.2.3.2. Кроме того, после исправления производственного процесса интервал выборки необходимо сбрасывать до значения по умолчанию, определенного выше, и увеличивать только в том случае, если выполняются условия, определенные выше.

5.2.4 Требования к интеграции в транспортные средства

5.2.4.1 Этикетки

Баллоны должны быть маркированы четкими и износостойкими этикетками, постоянно прикрепленными к ним, и соответствовать нормативным требованиям. Этикетки должны включать производителя, дату изготовления, серийный номер, тип топлива, НРД, дату вывода из эксплуатации, «класс давления» (например, Н35 или Н70) и тип баллона (например, тип 1).

На этикетке СХКВ должно быть указано, что система хранения не может быть перенесена на другое ТС.

Если водородная система высокого давления имеет цветовую маркировку, систему следует окрашивать в красный цвет.

Компоненты системы хранения (например, обратный клапан, запорный клапан, ТУСД) должны иметь четкую постоянную маркировку в соответствии с 4.4.1. Как минимум, должен быть указан «класс давления» (например, Н35 или Н70).

5.2.4.2 Установка и монтаж

Общие требования к установке и монтажу приведены в 4.4.2.

Интеграцию систем хранения сжатого водорода в ТС необходимо проектировать таким образом, чтобы сохранять устойчивость к воздействию огня, который может привести к нарушению целостности структур или вызвать избыточное давление из-за нагрева хранящихся газов. ТУСД должно быть расположено так, чтобы выявить возгорание и активироваться до взрыва.

Изготовитель ТС должен исследовать потенциальные источники локальных пожаров и исключить возможность резкого термического воздействия на систему хранения без термической активации ТУСД, чтобы гарантировать, что система хранения не взорвется от локализованных источников огня. Допол-

нительные указания приведены в приложении Е. Изготовитель должен задокументировать проектные решения в отношении воздействия локализованных пожаров.

5.2.4.3 Системы сброса

Вентиляционные линии ТУСД следует проектировать таким образом, чтобы обеспечивать адекватную вентиляцию газа и предотвращать попадание посторонних частиц или накопление влаги в вентиляционных линиях. Трубопровод должен быть изготовлен из материалов, устойчивых к воздействию огня. Дополнительные указания см. в приложении Е и в ГОСТ Р 70679. Изготовитель ТС должен свести к минимуму возможность пережима вентиляционных линий ТУСД при воздействии огня или аварии.

5.2.4.4 Заправка и слив топлива

Требования к емкости для топливной системы на сжатом водороде ТС приведены в [1]. В СХКВ должен использоваться обратный клапан или другое устройство на пути наполнения для предотвращения обратного потока и нежелательного выброса водорода в случае выхода из строя устройства предотвращения обратного потока внутри сосуда.

Изготовителю ТС необходимо предоставить процедуры слива топлива из ТС в соответствии с ГОСТ Р 70679. Для слива топлива обычно требуется сброс давления в бортовом топливном хранилище и/или топливной системе до рекомендуемого уровня с последующей продувкой инертным газом, который уменьшает содержание водорода в системе до безопасного уровня. Если возможен отказ автоматического отключения, как описано в 5.2.1.2, процедуры должны распознавать этот вид отказа и обеспечивать возможность слива топлива и ремонта системы. Водородные топливные системы следует должным образом продувать инертным газом перед первоначальной заправкой водородом, чтобы предотвратить образование горючих смесей внутри системы.

5.2.4.5 Техническое обслуживание и ремонт автомобиля

Обслуживание и ремонт необходимо выполнять в соответствии с рекомендациями производителя и только обученными техническими специалистами, уполномоченными производителем ТС, производителем системы хранения, или имеющими сертификат обучения. Ни один баллон со следами удара или другого повреждения не должен быть возвращен в эксплуатацию.

5.2.4.6 Ограничения срока службы

Квалификационные испытания СХКВ соответствуют 25-летнему сроку службы автомобиля. Требования к повторной аттестации не установлены, в связи с чем переустановка системы хранения (или контейнеровозов) между ТС не допускается.

5.2.4.7 Повторная аттестация для обслуживания после потенциально опасного события или аварии

Требования к продолжению эксплуатации ТС после аварии не установлены.

Системы хранения сжатого водорода в ТС, которые были вовлечены в пожар, аварию, затопление или другие события, приведшие к повреждению, должны быть проверены на пригодность к дальнейшей эксплуатации.

Сосуды хранения необходимо выводить из эксплуатации, утилизировать или возвращать производителю для оценки, если очевидны какие-либо неприемлемые повреждения. Компоненты и детали (кроме сосуда) следует заменять или ремонтировать в соответствии с инструкциями производителя ТС.

Сосуды, не подвергшиеся повреждениям, могут быть возвращены в эксплуатацию в том же ТС, но не могут быть перемещены в другое ТС для продолжения эксплуатации.

Приложение А
(обязательное)

Руководство по совместимости материалов для работы с водородом, включая системы хранения сжатого водорода

Компоненты, контактирующие с газообразным водородом или водородосодержащими средами, а также детали, используемые для их уплотнения или соединения, должны быть достаточно стойкими к химическому и физическому воздействию сред, в которых они работают.

А.1 Воздействие водорода на материалы

Материалы, подвергающиеся воздействию водорода в рабочей среде, могут проявлять повышенную восприимчивость к ухудшению свойств, называемыми «водородным охрупчиванием» и «водородной коррозией».

Водородное охрупчивание определяется как процесс, приводящий к снижению пластичности металла из-за растворения и диффузии в него атомарного водорода. Эти процессы обратимы и отличаются от водородной коррозии, являющейся необратимым процессом.

Водородное охрупчивание и коррозия могут возникать в средах с высоким давлением и высокой температурой, во время термической обработки при повышенных температурах, во время гальванического покрытия, в процессе эксплуатации при контакте с техническими жидкостями, из-за коррозионных реакций или катодной защиты. Эти явления могут воздействовать на металлы независимо от их кристаллической структуры или температуры. Результат таких воздействий может проявляться в различных формах, таких как вздутие, появление трещин, образование гидридов металлов и снижение пластичности.

Водородное охрупчивание подразделяют на два типа. Первый, называемый внутренним водородным охрупчиванием, происходит, когда атомарный водород диффундирует в металл и перенасыщает структуру металла. Под действием приложенного давления растворенный в металле водород снижает сопротивление на разлом. Второй тип, называемый внешним водородным охрупчиванием, возникает в результате одновременного воздействия водорода и приложенной нагрузки. В этом случае атомарный водород диффундирует в приповерхностный объем металлов и способствует распространению поверхностных дефектов. В каждом случае водородное охрупчивание частично обусловлено диффузионными процессами. При внутреннем водородном охрупчивании концентрация водорода в металле со временем может увеличиваться. При внешнем водородном охрупчивании распространение поверхностных дефектов зависит от времени, и скорость роста докритических трещин может определяться свойствами диффузии водорода.

Атомарный водород, диффундирующий в металл, взаимодействует с внутренними дефектами и полями напряжений в металле, что увеличивает склонность к распространению трещин и ухудшает такие свойства, как пластичность (часто более чем на 50 %) и вязкость. Существуют различные факторы, как внешние, так и внутренние, которые способствуют разрушению металлов под действием водорода. Химический состав материала является важным фактором, поскольку элементы-примеси, концентрация которых может варьироваться в зависимости от методов обработки материала, могут влиять на стойкость металла к разрушению под действием водорода. Элементы-примеси, например, фосфор и сера в ферритных сталях, могут концентрироваться на границах зерен и способствовать разделению этих границ под воздействием водорода. При обработке металлов можно увеличить их диапазон прочности, но сопротивление разрушению под действием водорода обычно снижается по мере увеличения прочности сплава. Водород может незначительно, от 5 % до 10%, влиять на предел текучести.

Внешние факторы, влияющие на водородное разрушение, включают температуру, давление водорода, химическую среду и скорость деформации. Склонность к разрушению под действием водорода растет по мере увеличения давления водорода. Влияние температуры не носит такого системного характера. Некоторые металлы, например, аустенитные нержавеющие стали, демонстрируют локальный максимум склонности к разрушению под действием водорода в зависимости от температуры.

Газы, смешанные с газообразным водородом, также могут влиять на разрушение с помощью водорода. Влага, например, может быть вредной для алюминиевых сплавов, поскольку влажное окисление приводит к образованию газообразного водорода, в то время как в некоторых сталях, напротив, влага улучшает сопротивление разрушению под действием водорода за счет образования поверхностных пленок, которые служат кинетическими барьерами для диффузии водорода в металл. Металлы менее подвержены разрушению под действием водорода при высоких скоростях деформации.

Водородная коррозия

При температурах выше 473 °С многие низколегированные конструкционные стали подвергаются водородной коррозии. Это необратимое разрушение микроструктуры стали, вызываемое химической реакцией между диффундирующим водородом и карбидной составляющей стали, приводящей к образованию пор, содержащих метан. Кроме того, водород может обратимо реагировать с некоторыми металлами, такими как титан или цирконий, с образованием соответствующих гидридов металлов, увеличивающих своим присутствием в структуре хрупкость материала.

Общие рекомендации по снижению риска водородного охрупчивания и водородной коррозии:

- при выборе материалов необходимо руководствоваться данными об их склонности к водородному охрупчиванию, обращая внимание на их химический состав (например, использовать карбидные стабилизаторы или снижать содержание примесей, таких как фосфор и сера), микроструктуру (например, использование аустенитных нержавеющих сталей) и механические свойства (например, ограничение твердости и минимизация остаточных напряжений). Информация о материалах и методах их испытаний приведена в А.2 и А.3;
- необходимо свести к минимуму уровень воздействий, приводящих к усталости материалов;
- при нанесении покрытий на детали необходимо следить за площадью поверхности анод/катод и производительностью, тем самым обеспечивая должное управление плотностью тока. Высокая плотность тока увеличивает накопление водорода;
- необходима очистка металлов в некатодных щелочных растворах и в растворах ингибированных кислот;
- следует использовать абразивные чистящие средства для материалов с твердостью 40 HRC или выше;
- при необходимости следует использовать контрольные проверки процесса во избежание водородного охрупчивания во время производства.

Производителям также рекомендуется проводить квалификационные испытания материалов в водородной среде, идентичной предполагаемой при эксплуатации. При проектировании следует учитывать возможное снижение предела текучести и вязкости.

Полимеры, эластомеры и другие неметаллические материалы

Большинство полимеров можно считать подходящими для работы с газообразным водородом, однако следует учитывать, что водород диффундирует через эти материалы гораздо легче, чем через металлы. Политетрафторэтилен и полихлортрифторэтилен, как правило, подходят для работы с водородом. Пригодность других материалов подлежит проверке.

Обзор квалификационных испытаний материалов

Таблица А.1 — Перечень требований к квалификационным испытаниям материалов

Общие испытания материалов для сосудов высокого давления	
Д.1	Пластмассы
Д.2	Смолы
Д.3	Наружные покрытия
Д.4	Металлы
Испытания на совместимость металлов с водородом	
А.2.1	Дополнительные сведения к топливным системам низкого давления
А.2.2	Затворы системы хранения высокого давления
А.2.3	Защитные оболочки баллонов высокого давления
А.3	Испытания на совместимость с водородом высокого давления конструктивно-допустимых материалов
А.4	Испытания на совместимость с водородом с учетом особенностей конструкции баллонов высокого давления
Сопротивление разрыву напряжения	
Ж.1	Требования к сопротивлению на разрыв
Ж.2	Испытания на сопротивление на разрыв

А.2 Совместимость с водородом (требования по стойкости к охрупчиванию) систем хранения компримированного водорода и топливных систем на компримированном водороде

А.2.1 Дополнительные сведения к водородным топливным системам низкого давления

Все трубопроводы и другие устройства топливных систем, не включенные в систему хранения сжатого газообразного водорода, должны удовлетворять применяемым требованиям, установленным для данной системы.

А.2.2 Затворы систем хранения сжатого газообразного водорода высокого давления (СХКВ)

Все критически важные запорные компоненты, такие как запорный клапан, ТУСД и обратный клапан, использующиеся в системе хранения высокого давления (см. 5.2, рисунок 2), должны удовлетворять требованиям, предъявляемым аттестацией конструкции.

Металлические сплавы, применяемые в элементах СХКВ, контактирующих с водородом (кроме сварных швов), должны соответствовать требованиям А.3 либо применяться с соблюдением условий, перечисленных в таблице А.2. Сварочные материалы соответствуют требованиям А.3.4.

А.2.3 Защитные оболочки баллонов высокого давления

Защитная оболочка должна быть способной выдерживать циклы давления N_D от менее 2 МПа до 125 % НРД с газообразным водородом (N_D установлено в 5.2.2).

Металлические сплавы в защитной оболочке, находящиеся в контакте с водородом (кроме сварных швов) соответствуют требованиям А.3, либо применяются с соблюдением условий, перечисленных в таблице А.2. Сварочные материалы должны соответствовать требованиям А.3.4.

Защитная оболочка баллона должна отвечать требованиям к совместимости с водородом в соответствии с процедурами испытаний, приведенными в А.4.

Примечание — Рекомендации по материалам, приведенным в таблице А.2, основаны на использовании в баллонах со сжатым водородом высокого давления. Учитывая совместимость этих материалов с водородом, другие компоненты СХКВ (или компоненты, работающие на водороде под высоким давлением) также могут использовать рекомендации по материалам в таблице А2.

Таблица А.2 — Оценка совместимости с водородом в зависимости от условий использования

Материал	НРД	Состав материала и его обработка	Условия применения в пределах 1,5 × НРД
Сталь [1), 2)] S 31603, S 31608 DIN 1.4401 DIN 1.4404 DIN 1.4435 UNS S31600/AISI 316 UNS S31603/AISI 316L	≤ 70 МПа	Нет ограничений, кроме примечания к А.2.3	Отсутствие значительного ухудшения характеристик при долговременной эксплуатации с водородом [4)]
Сталь [1), 2)] SUS 304 SUS 316 SUS 316L	≤ 70 МПа	Аустенитная нержавеющая сталь с упрочняющей термообработкой	Отсутствие значительного ухудшения характеристик при долговременной эксплуатации с водородом [4)]
Сталь [1), 2)] S31603, S31608 DIN 1.4401 DIN 1.4404 DIN 1.4435 UNS S31600/AISI 316 UNS S31603/AISI 316L	≤ 70 МПа	≥ 13 % Ni [3)] ≤ 0,25 % N [3)] примечание 2	Отсутствие существенной деградации при работе с водородом
Сталь [1), 2)] DIN 1.4433 UNS S31703/DIN 1.4438 DIN 1.3952 UNS N08926/DIN 1.4529 UNS N08904/DIN 1.4539	≤ 70 МПа	Нет ограничений, кроме примечания к А.2.3	Отсутствие существенной деградации при работе с водородом
Алюминий [5),6)] A6061-T6 A6061-T62 A6061-T651 A6061-T6511	≤ 70 МПа	Нет ограничений	Отсутствие существенной деградации при работе с водородом

Окончание таблицы А.2

[1] Сталь не обладает абсолютной совместимостью с водородом (например, более низкая устойчивость к дефектам) во всем указанном диапазоне состава материала, но успешно используется в водородных технологиях в течение многих лет за счет ограничения напряжения, что подтверждено успешным опытом (включая контрольные испытания). Могут быть уместны циклические испытания водородом, например указанные в А.4.

[2] В качестве полуфабрикатов следует использовать кованый или катанный материал, упрочненный термообработкой. Кроме того, конечные продукты должны содержать менее 3 % (по объему) магнитных фаз (дельта-феррит + мартенсит), определяемых ферритометром.

[3] Производители должны установить и задокументировать правила, гарантирующие соблюдение ограничений использования, и хранить эти документы, включая данные испытаний, в течение 15 лет.

[4] Данные стали можно использовать в водородных технологиях, ограничивая допустимое расчетное напряжение уровнем напряжения ниже их предела выносливости. Поскольку сертификация материала основана на успешном опыте работы в промышленных условиях, пределы текучести и предельной прочности, основанные на промышленной практике, также следует рассматривать при проектировании в целях ограничения напряжения.

[5] В настоящем стандарте использовано следующее обозначение марок алюминия: A6061-T6; A6061-T62; A6061-T651; A6061-T6511. При использовании данных марок алюминия для СХКВ следует учитывать коррозию в среде влажного газа. Совместимость алюминиевого сплава в среде влажного газа оценивают с помощью испытания на коррозионное растрескивание под воздействием влажного газа.

[6] Некоторые сплавы алюминия не подходят для использования во влажной среде. Проблема заключается в микроструктуре материала, размере зерна, примесях и т. д. Рассматривается возможность использования внутренних деталей (например, лейнер баллона типа 3), подвергающихся воздействию только сухого водорода.

А.3 Испытание на совместимость материалов с водородом при высоком давлении

Методики испытаний, устанавливающие требования к проверке долговечности материалов, используемых в водородных топливных системах:

- определение материалов и условий испытаний;
- испытание на медленную деформацию, ИР;
- испытание на усталостную долговечность (квалификационная аттестация материала);
- квалификационные испытания сварных конструкций.

Для аттестации основных (не свариваемых) материалов используют А.3.2 и А.3.3; А.3.4 используют в случае применения сварки материалов.

В таблице А.3 показана взаимосвязь между минимально значимыми свойствами материалов (согласно соответствующим стандартам), критерием их допуска к испытаниям (по результатам заводской сертификации или эквивалентными испытаниями на воздухе) и требованиями к испытаниям в газообразном водороде, как описано в А.3.2 (ИР) и А.3.3 (испытание на усталостную долговечность) для использования в условиях высокого давления.

Таблица А.3 — Сводка определений материалов и требований к испытаниям на совместимость материалов с водородом высокого давления

	Минимальные значимые свойства выбранных материалов	Критерий отбора (измеренные значения согласно А.3.1.1)	Требования к квалификационным испытаниям в водороде (А.3.2 и А.3.3)
Окружающая среда	—	На воздухе при комнатной температуре в соответствии со стандартными процедурами испытания	В газообразном водороде при давлении 1,25 × НРД и температуре из таблицы А.4
Предел текучести	S_y	≥ S_y	≥ S_y
Предел прочности	S_U	≥ S_U	≥ S_U
Способность к деформационному упрочнению	$S_U / S_y > 1{,}07$	> 1,07	> 1,07
Удлинение	*El*	≥ *El*	≥ 12 %

Окончание таблицы А.3

	Минимальные значимые свойства выбранных материалов	Критерий отбора (измеренные значения согласно А.3.1.1)	Требования к квалификационным испытаниям в водороде (А.3.2 и А.3.3)
Усталость	—	—	$N > 2 \times 10^5$ (гладкий) $N > 10^5$ (с надрезом) для максимального напряжения ≥ (1/3) S_{UTS}

А.3.1 Свойства материалов и условия испытаний

А.3.1.1 Рассматриваемый материал должен соответствовать требованиям, которые включают:

- допустимые пределы химического состава;
- заданный минимальный предел текучести, *Sy*;
- заданная минимальная прочность на растяжение, *Su*;
- заданное минимальное удлинение, *El*.

Проверка того, что материал соответствует техническим требованиям, может быть основана на сертификации производителя материалов или эквивалентных испытаниях, проводимых на воздухе при комнатной температуре. Среднее значение измеренной прочности при растяжении при комнатной температуре на воздухе обозначается как СЗИП и используется для определения максимального напряжения при испытании на усталость.

А.3.1.2 Параметры для испытаний в водороде (например, температура, давление, скорость деформации, частота циклов нагрузки), указанные в А.3.1—А.3.3, должны превалировать над рекомендуемыми аналогичными параметрами в соответствующих стандартах.

А.3.1.3 ИР (см. Б.3.2) и испытание на усталостную долговечность (см. А.3.3) должны выполняться в газообразном водороде при минимальном давлении 1,25 × НРД. Следует выполнять требования к чистоте газа и отбору проб газа.

А.3.1.4 Температура испытаний в водороде должна соответствовать таблице А.4.

Таблица А.4 — Температура испытания

Тип сплава	Метод испытания	Температура испытания, К
Аустенитная нержавеющая сталь	ИР и долговечность	228 ± 5 228 ± 5 и 293 ± 5
Сплавы на основе никеля	ИР и долговечность	228 ± 5
Алюминиевые, магниевые и медные сплавы	ИР и долговечность	293 ± 5
Другие сплавы	ИР и долговечность	228 ± 5 и 293 ± 5

А.3.2 Испытание на медленную скорость деформации (испытание на растяжение)

А.3.2.1 ИР должны удовлетворять условиям, приведенным в А.3.1. Испытывают не менее трех образцов с гладкой поверхностью.

А.3.2.2 Смещение во время испытания должно быть измерено на образце на условной расчетной длине (в 3—5 раз больше диаметра образца). Обычно это экстензометр, прикрепленный непосредственно к образцу, но допустимы и другие эквивалентные методы.

А.3.2.3 Требования

Средний предел текучести должен быть больше или равен указанному минимальному пределу текучести материалов.

Средняя прочность на растяжение — больше или равна указанной минимальной прочности на растяжение материалов.

Способность к деформационному упрочнению, определяемая как отношение предела прочности на растяжение к пределу текучести, измеренная с помощью ИР, — больше 1,07.

Среднее удлинение должно быть больше или равно 12 %.

А.3.3 Испытание на усталостную долговечность — квалификационные испытания материала

А.3.3.1 Испытания на усталостную долговечность с контролируемой силой должны выполняться в соответствии с условиями, указанными в А.3.1, при частоте 1 Гц. Образец одной из двух геометрий, указанных ниже, должен быть испытан с отношением нагрузки *R*, как указано:

- гладкие образцы с $R = -1$ или
- образцы с надрезом при $R = 0{,}1$.

А.3.3.2 Приложенное усталостное напряжение при максимальной нагрузке должно быть больше или равно 1/3 предела прочности на растяжение по А.3.1.1 (СЗИП измеряется на воздухе). Приложенные напряжения как для гладких образцов, так и для образцов с надрезами определяются как приложенная нагрузка, деленная на минимальную начальную площадь поперечного сечения образца.

А.3.3.3 Требования

Необходимо удовлетворять одно из требований:

а) для испытаний на усталость гладких образцов следует испытывать не менее трех образцов, а число примененных циклов должно быть более 2×10^5 для всех испытуемых образцов;

б) для испытаний на усталость образцов с надрезом должно быть испытано не менее трех образцов, а количество примененных циклов должно быть больше 2×10^5 для всех испытаний; или пять образцов должны быть испытаны, и количество примененных циклов — больше 10^5 для всех испытаний.

А.3.4 Квалификационные испытания сварных конструкций

А.3.4.1 Для испытания берут типичные сварные конструкции, состоящие каждая из двух базовых металлических изделий (например, пластин или труб), соединенных сварным швом. Основные материалы, сварочные материалы и параметры сварки (например, количество сварочных проходов и температура между проходами), используемые для создания сварного шва, должны быть задокументированы. Материалы сборочных единиц должны удовлетворять требованиям таблицы Б.3.

А.3.4.2 Используя конструкции, подготовленные по А.3.4.1, готовят испытательные образцы, соответствующие геометрии для ИР, приведенного в А.3.2, и для испытания на усталостную долговечность, приведенного в А.3.3. Для образцов с надрезом центр надреза должен располагаться по центру сварного шва, а ось растяжения должна быть перпендикулярна сварному шву.

А.3.4.3 Образцы, изготовленные из сварных швов, должны соответствовать требованиям таблицы А.3 для испытаний в водороде, где установленные минимальные предел текучести и предел прочности при растяжении указаны для конструкции сварного соединения.

А.4 Испытания на совместимость с водородом с учетом особенностей конструкции баллонов высокого давления

На аттестационные испытания должны быть представлены четыре баллона.

Внешние размеры (такие как длина, диаметр и толщина стенки) и начальное давление разрыва баллонов должны отличаться друг от друга не более чем на 10 %.

Два баллона следует подвергать циклическому изменению давления газообразного водорода в соответствии со следующими положениями:

- требования к газообразному водороду, используемому для этого испытания, приведены в [6], содержание кислорода — менее 1 мкмоль на моль газа. Чистота водорода должна контролироваться через определенные промежутки времени во время испытания;
- уменьшение внутреннего объема баллонов за счет использования наполнителя допускается при условии, что сохраняется > 99 % воздействия водорода на поверхность;
- границы циклов давления водорода в каждом баллоне должны быть между 2 МПа и 125 % НРД (+1) МПа. Продолжительность стадии повышения давления за цикл должна быть не менее 5 минут. Продолжительность пикового давления за цикл не должна быть менее 2 минут;
- один баллон должен подвергаться испытанию при температуре окружающего воздуха от минус 50 °С до минус 45 °С и температуре топлива от минус 35 °С до минус 30 °С. Один баллон должен подвергаться испытанию при температуре окружающего воздуха от плюс 20 °С до плюс 25° С и температуре топлива от плюс 20° С до плюс 25 ° С. Утечка измеряется непрерывно или после циклов давления N_D использованием процедуры испытаний Б.7 (N_D устанавливается в 5.2.2.). Испытания должны быть прекращены, если либо произошла утечка, либо проведено $2 \times N_D$.

Примечание — Следует рассмотреть возможность утечки или разрыва испытуемого изделия и принять соответствующие меры, чтобы во время испытаний не возникала опасная ситуация;

- если в течение циклов давления N_D не происходит утечек, а в течение 2 циклов N_D не происходит разрыва, то требования испытаний выполнены и испытание следует прекратить;
- должны быть зарегистрированы срок службы под давлением водорода и число циклов, при которых происходит утечка в этом испытании.

Баллоны, не имеющие металлов, контактирующих с водородом, признаются соответствующими требованиям этого испытания.

Баллоны, конструкция и отделка внутренней поверхности которых сравнимы с конструкцией, прошедшей испытание, также должны рассматриваться как прошедшие это испытание, если они отвечают следующим критериям:

- цилиндрическая форма с диаметром в пределах 20 % от диаметра испытанного баллона;
- изменение толщины цилиндрической стенки (и толщины металлического лейнера, если применимо) пропорционально изменению диаметра;

- BP_0 находится в пределах 20 % от начального давления разрыва испытанного сосуда;
- изменение толщины цилиндрической стенки (и толщины металлического вкладыша) пропорционально изменению начального давления разрыва. Производители должны документировать свойства отделки поверхности (характеристики материала, процессы отделки поверхности, параметры поверхности), диаметр, толщину стенки (и толщину металлического лейнера) и начальное давление разрыва.

Приложение Б
(обязательное)

Хранение сжатого водорода, квалификационные испытания

Квалификационные испытания предназначены для демонстрации рабочих характеристик и долговечности водородных топливных систем под давлением.

Испытания, приведенные ниже, связаны с воздействием опасных условий. Испытания под давлением компонентов и систем представляют потенциальную опасность большого выброса энергии, которую необходимо контролировать с помощью контрмер в испытательном оборудовании и инструкциях по эксплуатации. Кроме того, испытания с водородом могут привести к скоплению легковоспламеняющихся газов. Требуются соответствующие меры для того, чтобы испытания проводились без риска для персонала или имущества.

Квалификационные испытания могут проводиться для всей системы (за один раз) или, по усмотрению изготовителя, могут выполняться для отдельных частей системы одновременно, пока в конечном итоге вся система не будет аттестована.

Отсутствие значительной утечки или разрыва является требуемой характеристикой испытаний, указанных в Б.1, Б.2, Б.4, Б.5, Б.8, Б.9, Б.10 и Б.11. Если в любом из этих испытаний во время испытаний по 5.2.2.1 или 5.2.2.2 происходит значительная утечка или разрыв, то эта серия испытаний должна быть прекращена, а возникшая проблема устранена посредством изменения конструкции и/или производственного процесса. После осуществления этих операций измененные системы могут быть повторно подвержены квалификационным испытаниям.

Б.1 Испытание пробным давлением

Испытываемое изделие должно быть помещено в оболочку или приспособление для испытаний, чтобы обеспечить герметизацию и, при необходимости, защиту в случае разрушения изделия.

Испытуемое изделие подвергают плавному и непрерывному нагнетанию давления до тех пор, пока не будет достигнут целевой уровень испытательного давления, а затем удерживают в течение не менее 30 секунд (или дольше, если время удержания указано в процедуре испытания).

Компонент не должен разрываться, ломаться, иметь признаки неприемлемой утечки или подвергаться необратимой деформации.

Механические компоненты должны быть в рабочем состоянии после завершения испытания, особенно при выполнении критических с точки зрения безопасности функций, например отключения подачи топлива.

Б.2 Пневматическое испытание на утечку

Испытываемое изделие необходимо помещать в корпус или приспособление для испытаний, обеспечивающее обнаружение недопустимых утечек и, при необходимости, защиту в случае разрушения изделия.

Внутренние (сквозные) утечки запорных устройств, если таковые имеются, должны быть выявлены во время испытания путем закрытия этих клапанов и позволяя выпускным клапанам отводить любую утечку. Если система является «открытой» и в ней не предполагается использование запорных устройств, впускные и выпускные отверстия необходимо герметизировать, чтобы в системе можно было создать давление и проверить ее на предмет утечек.

Утечку можно определить путем регистрации изменения массы или давления за определенный период времени, измерения расхода, необходимого для достижения заданного давления, или путем измерения присутствия тестового газа в корпусе.

При испытании следует использовать газ или жидкость в зависимости от предполагаемой технологической среды. По указанию производителя могут использоваться и другие газы.

Испытание должно проводиться при указанном давлении, а измеренная утечка должна быть меньше или равна указанному значению.

Б.3 Гидравлическое испытание на разрыв

Испытание на разрыв должно проводиться при температуре окружающей среды.

Баллон следует устанавливать последовательно между источником давления и устройством измерения давления.

Скорость нагнетания давления находится в следующих пределах:

- менее 100 % — НРД/мин (1,17 МПа/с для НРД 70 МПа);
- более 30 % — НРД/мин (0,35 МПа/с для 70 МПа НРД), для последних 50 % — НРД перед взрывом.

Давление разрыва баллона должно быть зарегистрировано. Если указано целевое давление разрыва, то давление разрыва баллона должно его превышать.

Б.4 Циклическое гидравлическое испытание

Циклическое гидравлическое испытание должно выполняться следующим образом.

а) Баллон заполняют неагрессивной средой.

б) Температуру баллона устанавливают на заданном уровне в начале испытаний; температуру окружающей среды, обшивки баллона и неагрессивной среды поддерживают в заданном диапазоне температур в течение всего времени проведения испытаний; температура баллона может варьироваться.

в) Осуществляют циклы нагнетания и сброса давления от 2 МПа до указанного максимального давления со скоростью не более 10 циклов в минуту до установленного количества циклов.

Во время испытаний баллона не должно быть утечки или повреждения.

Б.5 Циклическое испытание водородом

Циклическое испытание водородом согласно 5.2.2.2.1 должно выполняться следующим образом.

а) В начале испытаний устанавливают заданную температуру внутри системы хранения, уровень топлива и относительную влажность, выдерживая таким образом систему в камере с регулируемой температурой в течение не менее 24 часов. Заданную температуру и относительную влажность в испытательной среде поддерживают на протяжении оставшейся части испытания. (Если это требуется в спецификации испытаний, температура системы должна стабилизироваться на уровне внешней температуры окружающей среды между циклами давления).

б) В каждом цикле максимальное давление должно быть не ниже установленного максимального давления. Минимальное давление должно быть 2 МПа, если в системе управления не установлено другое минимальное давление; в этом случае контролируют слив топлива до минимального давления, разрешенного средствами управления системой.

в) Скорость наполнения и температура газа должны контролироваться в соответствии с протоколом быстрого наполнения в соответствии ГОСТ Р 70682, если указанные условия для конкретного сегмента испытаний не указывают иное. Если производитель соглашается на более высокую скорость наполнения во время квалификационных испытаний, она может быть принята для сокращения времени испытаний. Указанная температура заполнения должна поддерживаться мгновенно, за исключением кратковременных скачков температуры заполнения при начале заполнения (например, из-за скопления нагретого топлива в линиях заполнения) или приостановке.

г) За исключением сливов топлива, определенных на 3 этапе пункта 5.2.2.2.1 а), всякий раз слив топлива должен осуществляться со скоростью не ниже скорости сливов топлива для работы ТС с максимальной загрузкой, как определено и реализовано изготовителем ТС. Если в ТС используются устройства и/или средства управления для предотвращения экстремальных внутренних температур внутри баллона (например, нагреватель или ограничение скорости слива топлива для контроля внутреннего охлаждения), испытание может проводиться с этими устройствами и/или средствами управления. Если операционная система ТС ограничивает использование ТС определенным диапазоном температур, эти температуры могут использоваться в этой серии испытаний. Если изготовитель соглашается на более высокую скорость слива топлива во время квалификационных испытаний, она может быть принята для сокращения времени испытаний, но в этом случае не следует превышать минимальную температуру СХКВ. Перед испытанием следует указать и задокументировать максимальную скорость расхода топлива и минимальную температуру для СХКВ.

д) Осуществляют заданное количество циклов нагнетания и сброса давления.

Баллон не должен иметь следов утечки или повреждения во время испытаний.

Б.6 Испытание на просачивание и утечку

Комплексная система хранения водорода должна быть полностью заполнена газообразным водородом (полная плотность заполнения эквивалентна 1,00 × НРД при 15 °С и 1,15 × НРД при 55 °С). Система должна находиться под давлением газообразного водорода до 1,15 × НРД и выдерживаться при температуре +55 °С в корпусе, который может аккумулировать просачивающийся водород для определения его количества. Испытание необходимо продолжать до тех пор, пока измеренная скорость утечки не достигнет установившегося состояния на основании не менее трех последовательно полученных значений, разделенных не менее чем 12 часами и разбросом не более 10 %. Установившийся расход не должен превышать заданных требований к производительности.

Б.7 Испытание на локальную утечку

Для проведения испытания необходимо использовать пузырьковый тест с учетом следующих требований:

а) Выход запорного клапана (и других внутренних соединений с водородными системами) должен быть закрыт для этого испытания (поскольку испытание ориентировано на внешнюю утечку).

По усмотрению испытателя, испытуемое изделие может быть погружено в среду для испытания на герметичность, или же эта среда может быть нанесена на испытуемое изделие на открытом воздухе. В зависимости от условий пузырьки могут сильно различаться по размеру. Как правило, испытатель должен оценивать утечку газа на основе размера и скорости образования пузырьков.

б) Должна быть предусмотрена возможность визуального обнаружения неприемлемых утечек. При использовании стандартной среды для испытания на утечку ожидается, что размер пузырьков будет примерно 1,5 мм в диаметре. Для скорости 0,005 мг/с (приблизительно 3,6 $см^3$/мин) результирующая допустимая скорость образования пузырьков составляет около 2030 пузырьков в минуту. Даже если образуются гораздо более крупные пузырьки, утечка должна быть легко обнаружена и зарегистрирована. Например, допустимая скорость для пузырьков диаметром 6 мм будет составлять примерно 32 пузырька в минуту.

Если испытание на просачивание и утечку, приведенное в Б.6, дает общий расход меньше, чем указанная допустимая локальная утечка, то испытание на локальную утечку не требуется, так как общая утечка в системе ниже требования по локальной утечке.

Б.8 Испытание на удар

Один или несколько баллонов необходимо испытывать на падение при температуре окружающей среды без увеличения в них давления.

Поверхность, на которую падают баллоны, должна представлять из себя гладкую горизонтальную бетонную площадку или аналогичное сооружение.

Должно быть выполнено падение с каждого положения, описанного ниже. Для каждого испытания может быть взят отдельный баллон, однако все испытания на падение могут также проводиться на одном баллоне.

а) Однократное падение с горизонтального положения с высоты, нижняя точка которой находится на высоте не менее 1,8 м над поверхностью площадки.

б) Два падения, по одному разу на каждый торец баллона, из вертикального положения с потенциальной энергией не менее чем 488 Дж, но ни в коем случае высота нижнего конца не должна быть больше 1,8 м.

в) Однократное падение из наклонного положения под углом 45° так, чтобы центр тяжести находился на высоте 1,8 м над землей, а конец клапана был направлен вниз. Если днище находится ближе к земле, чем 0,6 м, угол падения следует изменить, чтобы сохранить минимальную высоту 0,6 м и центр тяжести 1,8 м над землей.

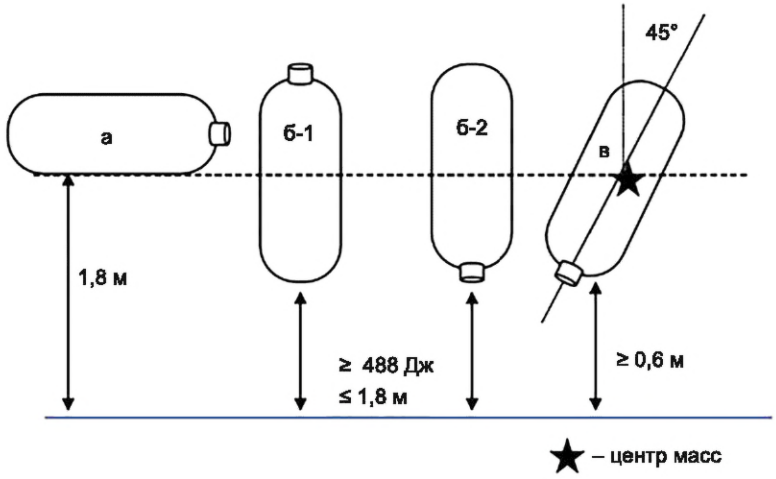


Рисунок Б.1 — Схема начальных положений при испытаниях на удар

Не следует предпринимать никаких попыток предотвращать подпрыгивание баллонов при падении. Разрешается предотвращать опрокидывание баллонов из вертикального положения в вариантах б) ударных испытаний.

Если для всех падений используется один баллон, то он должен продолжать подвергаться испытаниям согласно 5.2.2.3.

Если для выполнения испытаний используется более одного баллона, то они все должны быть подвергнуты 22000 циклов гидравлических циклических испытаний давлением при температуре окружающей среды не менее 1,25 × НРД в соответствии с процедурой испытаний, определенной в Б.4, или до тех пор, пока не произойдет утечка.

Утечка менее чем за 5500 циклов из любого баллона недопустима, в этом случае протокол испытаний 5.2.2.3 считается непройденным.

Если все баллоны завершают циклические испытания давлением без утечек, то баллон, подвергшийся удару под углом 45° [см. в)], должен продолжать прохождение испытаний, как указано в 5.2.2.3.

Если один или несколько баллонов протекают до 22 000 циклов, то баллон, подвергшийся падению наименьшее количество циклов, должен продолжать подвергаться испытаниям, как указано в 5.2.2.3.

Б.9 Испытание на повреждение поверхности

Образование поверхностных дефектов происходит следующим образом. Осуществляются два надреза на нижней наружной поверхности баллона вдоль цилиндрической зоны вблизи, но не в области полусфер баллона. Первый разрез должен иметь глубину не менее 1,25 мм и длину 25 мм по направлению к клапанному концу баллона. Второй разрез должен иметь глубину не менее 0,75 мм и длину 200 мм по направлению к краю баллона, противоположному клапану.

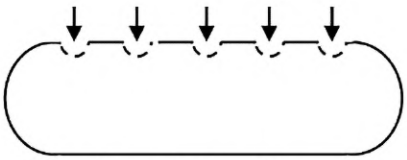
Маятниковые удары осуществляют следующим образом. Верхняя часть баллона должна быть разделена на пять отдельных не пересекающихся друг с другом зон диаметром 100 мм каждая (см. рис. Б.1). После 12-часовой выдержки при минус 40 °С в климатической камере, центр каждой из пяти площадок должен выдержать воздействие маятника, имеющего форму пирамиды с равносторонними гранями и квадратным основанием, вершина и ребра которой закруглены до радиуса 3 мм. Центр удара маятника должен совпадать с центром тяжести пирамиды. Энергия маятника в момент удара по каждому из пяти отмеченных мест на поверхности баллона должна составлять 30 Дж. Баллон должен быть закреплен на месте во время ударов маятника и не находиться под давлением.

Б.10 Испытание на химическую устойчивость

Каждая из пяти зон, предварительно обработанных маятниковым ударом (см. Б.9), подвергается воздействию одного из пяти растворов: первый — раствор 19 %-ной серной кислоты в воде (аккумуляторная кислота), второй — раствор 25 %-ного гидроксида натрия в воде, третий — раствор 5 %-ного метанола в бензине (среды на заправочных станциях), четвертый — раствор 28 %-ного нитрата аммония в воде (раствор мочевины) и пятый — раствор 50 %-ного метилового спирта в воде (жидкость стеклоомывателя).

Испытательный баллон размещают таким образом, чтобы зоны контакта со средой находились сверху. Прокладку из стекловаты толщиной примерно 0,5 мм и диаметром 100 мм помещают на каждую из пяти предварительно подготовленных областей, затем смачивают прокладку испытательным раствором в количестве, достаточном для обеспечения смачивания поверхности баллона и всей прокладки на протяжении всего испытания.

Воздействие испытательных растворов должно продолжаться в течение 48 часов при 1,25-кратном НРД, прежде чем баллон будет подвергнут циклическому испытанию под давлением. После прекращения химического воздействия прокладки из стекловаты удаляют, а поверхность баллона промывают водой.



Вид на баллон сбоку

Рисунок Б.2 — Расположение испытательных зон на поверхности баллона

Б.11 Высокотемпературное испытание статическим давлением

Давление в баллоне повышают до заданного значения и выдерживают при заданной внешней температуре в течение установленного непрерывного периода времени.

Примечание — Условия высокой температуры и низкого давления, которые могут возникнуть во время переходов до и после испытания статическим давлением, могут привести к серьезному повреждению некоторых типов баллонов. Давление и температуру во время переходных периодов можно контролировать, чтобы избежать ненужного повреждения испытываемого баллона.

Б.12 Испытание на локальное воздействие пламени

Испытываемый образец должен состоять из СХКВ, как показано на рисунке 2, с дополнительными соответствующими функциями, включая систему вентиляции (например, вентиляционную линию) и любое экранирование, прикрепленное непосредственно к баллону (например, термическая упаковка баллона и/или кожухи/заслонки ТУСД). Если эти дополнительные системы распространяются на два или более баллонов, то комбинированную систему из нескольких баллонов необходимо испытывать как единую систему. Если общим элементом является общая вентиляционная линия ниже по потоку от ТУСД, где возможны ограничения потока и обратный поток, то производительность этой вентиляционной линии может быть оценена с помощью математического или экспериментального анализа, а не огневых испытаний СХКВ.

Испытание проводят по одной из следующих двух методик, в зависимости от которых устанавливаются зоны локализованного воздействия огня и положения системы над ним.

Метод 1. Аттестация для общей установки на транспортное средство

Если конфигурация установки на ТС не определена (и аттестация системы не ограничена спецификой этой конфигурации), то областью локального воздействия огня должна быть область на испытательном изделии, наиболее удаленная от ТУСД. Если испытуемый образец цилиндрически не симметричен, он должен быть расположен над источником огня в наиболее уязвимом положении. Испытываемый образец может иметь только теплозащитные или другие защитные устройства, прикрепленные непосредственно к защитной оболочке баллона и использующиеся во всех ТС. Стандартные системы вентиляции (например, вентиляционная линия и ее облицовка) и

кожухи/заслонки ТУСД следует включать в испытуемое изделие, если предполагается их использование в штатной работе системы.

Если система была испытана без каких-либо ее стандартных компонентов, то требуется повторное испытание этой системы, если ее применение в ТС предполагает использование этих стандартных компонентов. Если в ТС установка конструкций, экранировки или любого другого элемента ставит под угрозу способность ТУСД активироваться из-за локальных или всепоглощающих пожаров, то необходимо повторное испытание с использованием метода 2, учитывающего особенности конструкции ТС.

Примечание — Предполагается, что экранировки и другие защитные устройства и системы будут защищать всю систему, а не только область, подверженную воздействию огня.

Испытываемый образец должен находиться под давлением газообразного водорода до НРД и располагаться горизонтально примерно на расстоянии 100 мм над источником огня. Источник возгорания должен находиться в начале продольной зоны длиной (250 ± 50) мм, расположенной под локализованным участком испытуемого изделия. Пламя должно охватывать весь диаметр (ширину) испытываемого образца.

Метод 2. Аттестация для конкретной установки на транспортном средстве

Если указана особая конфигурация установки на ТС (и аттестация системы ограничена этой конкретной конфигурацией), то, по усмотрению изготовителя, испытуемое изделие может также включать дополнительные компоненты самого ТС в той же конфигурации, в которой они штатно устанавливаются в ТС. Зона локального воздействия огня определяется на основе конфигурации установки с учетом всех возможных направлений возникновения пожара: со стороны салона, грузового/багажного отсека, колесных углублений или пролившегося на землю бензина. Зона воздействия локализованного возгорания устанавливается путем определения любого отверстия или прохода в соседней конструкции или в ограждении в пределах 200 мм от сосуда размером от 10 до 300 мм (ширина и длина), в том числе отверстия, закрытые пластиком или другим плавким материалом. Идентификация зон локализованного возгорания должна быть задокументирована изготовителем ТС и организацией, уполномоченной проводить испытания. Если для конкретной конфигурации ТС выявлено несколько зон локального возгорания, то испытание следует проводить на одной или нескольких наиболее уязвимых зонах по согласованию между изготовителем и организацией, уполномоченной проводить испытания. Для ТС, которые включают в себя компоненты, такие как экранировки или барьеры, которые не прикреплены к системе хранения, испытуемое изделие должно включать эти элементы в их соответствующем местоположении на ТС.

Примечание — Ожидается, что на ранней стадии разработки ТС системный интегратор оценит отверстия в листовом металле и другие элементы, окружающие систему хранения, чтобы уменьшить потенциальные локальные области возгорания, и при необходимости установит защитные компоненты (см. приложение Е).

Если в конкретной конфигурации установки в ТС пути локализованного воздействия огня не обнаружены, то областью локализованного воздействия огня при испытании устанавливают область на изделии, наиболее удаленную от ТУСД. Если испытуемый образец не является цилиндрически симметричным, он должен располагаться над источником огня в наиболее уязвимом положении.

Необходимо, чтобы испытываемый образец находился под давлением газообразного водорода до НРД и располагался горизонтально примерно на 100 мм над источником огня. Источник возгорания должен находиться в начале продольной зоны длиной (250 ± 50) мм, расположенной под локализованным участком испытуемого изделия. Пламя должно охватывать весь диаметр (ширину) испытываемого образца.

Если зоны локализованного возгорания для конкретной конфигурации установки в ТС определены, то узел или компонент, содержащий зону локализованного возгорания, должен быть расположен непосредственно над источником возгорания или размер первоначального источника пожара должен быть изменен в соответствии с размером и местоположением идентифицированной локализованной зоны воздействия.

Источником огня как для локализованного, так и для полного горения во время испытаний должны быть настраиваемые горелки СНГ. Для получения воспроизводимых результатов, соответствующих намеченной цели испытания, конфигурация горелки должна иметь, например, следующие характеристики:

а) длина и ширина должны быть такими, как определено выше для локализованной части огневого испытания и как определено ниже для части полного горения;

б) элементы горелки, отверстия или сопла должны быть распределены по установленной зоне возгорания таким образом, чтобы можно было поддерживать допустимый диапазон температурных условий и пределов на протяжении всего испытания:

1) высота пламени должна быть под или на нижней стороне испытуемого изделия. На верхней стороне или верхней части испытуемого изделия допустимо лишь незначительное выгорание выхлопных газов горелки;

2) испытываемое изделие не должно подвергаться воздействию температур, превышающих максимальные пределы испытания за границами предполагаемого района воздействия огня;

3) расход топлива в горелке должен быть регулируемым, а горелка должна обеспечивать стабильную работу в требуемом диапазоне режимов на протяжении всего испытания;

в) во время испытания массовый расход топлива горелки подлежит измерению для обеспечения улучшения управления испытанием и расчета ее тепловой производительности;

г) при необходимости должны быть предусмотрены ветрозащитные экраны и другие приспособления обеспечения независимости температурных условий и расположения огня относительно испытуемого изделия от местных погодных условий.

Перед проведением огневого испытания с испытуемым изделием необходимо подтвердить приведенные выше требования к источнику огня, что позволит отработать точность регулировки горелки, необходимую на протяжении всего испытания для поддержания требуемых температурных пределов.

Примечание — Во время проведения испытания ступенчатые изменения температуры лучше всего производить, сначала регулируя массовый расход горелки до приблизительного необходимого уровня, а затем точно настраивая его до достижения требуемых температурных пределов.

Следующие требования к испытаниям применяются независимо от того, используется ли метод 1 или метод 2 для определения локализованной зоны (зон), подверженной возгоранию:

- источник огня должен обеспечивать однородную минимальную температуру на испытуемом изделии, определяемую как изменения скользящих средних значений каждой термопары за одну минуту, при этом минимум пять термопар покрывают длину испытуемого изделия до 1,65 м (по крайней мере, две термопары в пределах локализованной зоны пожара и по крайней мере три термопары на равном расстоянии друг от друга, но не более 50 см друг от друга в оставшейся области), будучи расположены на расстоянии (25 ± 10) мм от внешней поверхности испытуемого изделия вдоль его продольной оси. По выбору изготовителя или испытательного центра дополнительные термопары могут быть расположены в точках измерения ТУСД или в любых других местах для необязательных диагностических целей;
- ветрозащитные экраны (как упоминалось выше) должны применяться для обеспечения равномерного нагрева;
- температурный профиль испытаний для локального огневого испытания показан на рисунке Б.3, а подробные температурные требования приведены в таблице Б.1. Температура на термопарах в зоне огня должна непрерывно повышаться до температуры не менее 600 °С в течение 3 мин после возгорания, а скользящая средняя температура должна поддерживаться на уровне не менее 600 °С в течение следующих 7 мин. Температура вне района первоначального очага возгорания в течение этих начальных 10 мин с момента возгорания не указывается. Затем в течение следующего двухминутного интервала температуру на термопарах в очаге возгорания необходимо увеличить не менее чем до 800 °С, а очаг возгорания следует расширить для получения скользящей средней температуры не менее 800 °С по всей длине и ширине испытуемого изделия (полное горение);
- испытуемое изделие необходимо выдерживать при заданной температуре (в условиях полного горения) до тех пор, пока система разгружается через ТУСД, а испытание необходимо продолжить до тех пор, пока давление не упадет ниже 1 МПа. Сброс давления должен быть непрерывным, а система хранения не должна разрушаться. Дополнительный выброс через утечку (минуя выброс через ТУСД), который приводит к пламени длиной более 0,5 м за пределами установленного периметра, может не произойти.

Положение огня относительно испытуемого изделия необходимо задокументировать достаточно подробно, чтобы обеспечить воспроизводимость скорости подвода тепла к испытуемому изделию. Результаты должны включать время, прошедшее с момента возгорания до начала сброса газов через ТУСД, а также максимальное давление и время откачки до достижения давления менее 1 МПа. Температура термопары и давление в баллоне должны регистрироваться с интервалом не более 10 с во время испытания. Любое отклонение от заданных температурных требований во время испытания делает результат недействительным только в том случае, если испытуемый образец не прошел испытание.

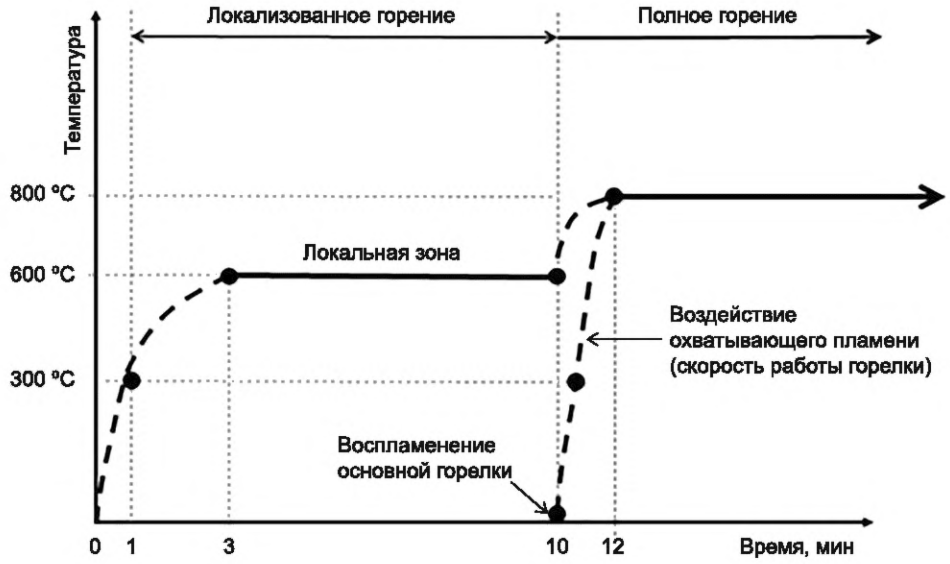


Рисунок Б.3 — Минимальная температура во время испытания на воздействие огнем

Таблица Б.1 — Описание испытания на воздействие огнем

	Воздействие на локализованную зону	Временной период	Воздействие охватывающего огня
Действие	Воспламенение горелок	0—1 минута	Горелка не работает
Минимальная температура	Не нормируется		Не нормируется
Максимальная температура	Менее 900 °С		Не нормируется
Действие	Повышение температуры и стабилизация огня до начала локального возгорания	1—3 минуты	Горелка не работает
Минимальная температура	Более 300 °С		Не нормируется
Максимальная температура	Менее 900 °С		Не нормируется
Действие	Длительное воздействие огнем	3—10 минут	Горелка не работает
Минимальная температура	1-минутная ср. скользящая более 600 °С		Не нормируется
Максимальная температура	1-минутная ср. скользящая менее 900 °С		Не нормируется
Действие	Увеличение температуры	10—11 минут	Основная горелка зажигается на 10-й минуте
Минимальная температура	1-минутная ср. скользящая более 600 °С		Не нормируется
Максимальная температура	1-минутная ср. скользящая менее 1100 °С		Менее 1100 °С
Действие	Повышение температуры и стабилизация огня перед началом полного горения	11—12 минут	Повышение температуры и стабилизация огня до начала воздействия
Минимальная температура	1-минутная ср. скользящая более 600 °С		Более 300 °С
Максимальная температура	1-минутная ср. скользящая менее 1100 °С		Менее 1100 °С

Окончание таблицы Б.1

	Воздействие на локализованную зону	Временной период	Воздействие охватывающего огня
Действие	Длительное воздействие огнем	12 минут — конец испытания	Длительное воздействие охватывающим пламенем
Минимальная температура	1-минутная ср. скользящая более 800 °С		1-минутная ср. скользящая более 800 °С
Максимальная температура	1-минутная ср. скользящая менее 1100 °С		1-минутная ср. скользящая менее 1100 °С

Б.13 Расширенное испытание на огнестойкость

От систем, которые удовлетворяют требованиям метода 1 из Б.12, не требуется, чтобы они удовлетворяли требованиям Б.13.

Испытуемый образец должен состоять из СХКВ, как показано на рисунке 2, с дополнительными соответствующими функциями, включая систему вентиляции (например, вентиляционную линию и ее покрытие) и экранирование, прикрепленное непосредственно к баллону. Если эти дополнения являются общими для двух или более баллонов, то комбинированную систему с несколькими баллонами следует испытывать как единую систему. Если общим элементом является общая вентиляционная линия ниже по потоку ТУСД, где могут возникать ограничения потока и обратная тяга, тогда производительность общей нижней вентиляционной линии может быть оценена с помощью математического или экспериментального анализа, а не огневых испытаний.

Система хранения должна располагаться горизонтально так, чтобы дно баллона находилось примерно на 100 мм выше источника огня. Если система хранения не является цилиндрически симметричной, она должна быть ориентирована над источником пожара в наиболее уязвимой конфигурации. Для предотвращения прямого попадания пламени на клапаны баллонов, фитинги и/или устройства сброса давления следует использовать металлические экраны, при этом они не должны находиться в непосредственном контакте с установленной системой противопожарной защиты (устройствами сброса давления или клапанами баллонов).

Если длина баллона менее 1,65 м, его центр должен располагаться над центром очага пожара. Если баллон имеет длину более 1,65 м и оснащен устройством сброса давления на одном конце, его следует располагать таким образом, чтобы центр источника огня находился на расстоянии 0,825 м от противоположного конца баллона, измеренного по горизонтали, по линии, параллельной продольной оси. Если баллон имеет длину более 1,65 м и оснащен устройствами сброса давления в нескольких местах по его длине, он должен быть расположен таким образом, чтобы часть баллона над центром источника огня была равноудалена от двух устройств сброса давления, разделенных наибольшим расстоянием, измеренным по горизонтали вдоль линии параллельно продольной оси баллона.

Источник ровного огня должен иметь длину 1,65 м и обеспечивать прямое попадание пламени на испытуемое изделие. Источник огня должен состоять из горелок СНГ, настроенных на обеспечение равномерной минимальной температуры на испытуемом изделии не менее 590 °С, определяемой как среднее скользящее 1-минутное значение на термопару, с минимум тремя термопарами, равномерно расположенными по всей длине источника огня не более 0,5 м друг от друга, расположенными на расстоянии (25 + 10) мм от внешней поверхности испытуемого изделия вдоль его продольной оси. На усмотрение изготовителя или испытательного центра дополнительные термопары могут быть расположены в точках измерения УСД или в любых других местах для необязательных диагностических целей. Ширина очага огня должна охватывать весь диаметр (ширину) системы хранения.

В течение 5 мин после возгорания источник пламени должен обеспечить равномерную температуру на термопарах не менее 590 °С по всей длине воздействия и поддерживать эту температуру до тех пор, пока в системе не начнется сброс давления через ТУСД и его значение не упадет ниже 1 МПа. Сброс давления должен быть непрерывным, а система хранения не должна разрушиться. Дополнительный выброс через утечку (не включая выброс через ТУСД), приводящий к возникновению пламени длиной более 0,5 м за периметром подаваемого пламени, может не происходить.

Положение огня относительно испытуемого изделия необходимо задокументировать достаточно подробно, чтобы обеспечить воспроизводимость скорости подвода тепла к испытуемому изделию. Для обеспечения равномерного нагрева должны применяться ветрозащитные экраны. Температура термопары и давление в баллоне следует регистрировать с интервалом каждые 10 с или менее во время испытания. Любое несоблюдение заданных температурных требований во время испытания делает результат недействительным.

Результаты должны включать время, прошедшее с момента возгорания до начала сброса давления через устройство сброса давления, а также максимальное давление и время вакуумирования до тех пор, пока не будет достигнуто давление менее 1 МПа.

Б.14 Испытание на удар при высокой скорости деформации

Баллон должен находиться под рабочим давлением и подвергаться воздействию любым из следующих способов:

а) бронебойная пуля калибром 7,62 мм, с номинальной скоростью 850 м/с должна быть выпущена с расстояния не более 45 м;

б) стальная пуля твердостью не менее 870 HV, диаметром от 6,08 до 7,62 мм, массой от 3,8 до 9,75 г, конической формы с углом при вершине 45°, номинальной скоростью 850 м/с и воздействием с минимальной энергией 3300 Дж.

Пуля должна удариться о боковую стенку баллона под углом 90°. Баллон не должен разорваться.

Приложение В
(обязательное)

Обоснование требований к проектированию и квалификационных требований к системам хранения сжатого водорода, определенных в 5.2

Первое условие: системы хранения водорода должны выдерживать нагрузки, связанные с ожидаемой эксплуатацией ТС на дорогах, и в условиях загруженности при эксплуатации на дорогах с полной функциональностью и без непреднамеренного выброса водорода. Загруженность в течение всего срока службы включает ожидаемые воздействия и виды использования, которые могут привести к выходу материала из строя, усталости, деградации или износу. Настоящий стандарт устанавливает квалификационные испытания, позволяющие подтвердить, что дизайн и конструкция обеспечивают способность выдерживать внешние воздействия с сохранением работоспособности.

Второе условие: способность оборудования выдерживать аварийные удары контролируется с помощью рекомендаций по конструкции ТС и, следовательно, проверяется как характеристика ТС в соответствии с ГОСТ Р 70679.

Третье условие: настоящий стандарт устанавливает серийно-квалификационные испытания, чтобы подтвердить способность производственных единиц соответствовать требованиям настоящего стандарта по квалификационным испытаниям.

Четвертое условие: настоящий стандарт определяет требования безопасности, основанные на следующих характеристиках:

- стандарты производительности могут обеспечить более высокий уровень гарантии безопасности за счет однозначного указания ожидаемых характеристик, которых должны достичь системы хранения водорода (проекты, материалы и конструкции) в экстремальных стрессовых условиях, даже при прекращении эксплуатации;
- квалификационные испытания, указанные в настоящем стандарте, предназначены только для систем хранения водорода на ТС.

В.1 Система хранения компримированного водорода

Опыт использования сжатого газообразного водорода в ТС ограничен 70 МПа. Использование более высоких давлений в ТС в настоящее время не предполагается, поэтому предел давления для этих спецификаций установлен на уровне 70 МПа.

В.2 Требования к конструкции

Основная стратегия безопасности при хранении топлива состоит в том, чтобы удерживать топливо и, при необходимости, безопасно выпускать топливо при определенных условиях. Вторичная стратегия безопасности заключается в том, чтобы изолировать топливо в системе хранения всякий раз, когда обнаруживается утечка. Эти стратегии требуют прочности баллонов и высоконадежных, долговечных и безотказных запорных устройств: обратного клапана, ручного запорного клапана, УСД с термическим активатором (ТУСД) и автоматического запорного клапана. Надежность и долговечность затворов гарантируется сертификацией.

В.3 Защита от избыточного давления

У избыточного давления есть два потенциальных источника, оба связаны с заправкой: первый — выход из строя заправочной станции и второй — заправка топливом системы хранения, которая больше не способна выдерживать давление заполнения. Риск избыточного давления можно свести к минимуму, если осуществлять заправки только на соответствующих заправочных станциях и проверять системы хранения водорода на устойчивость к усталости и деградации материала в течение ожидаемого срока службы.

Риск избыточного давления на заправочной станции сводится к минимуму за счет нескольких уровней защиты:

а) первый уровень: конструкция заправочного пистолета подходит только для топливозаборника систем хранения ТС, для которых предназначен данный уровень наддува. Например, топливная форсунка на 70 МПа подойдет только к заправочному патрубку ТС с системой хранения на 70 МПа;

б) второй уровень: первичная система безопасности на заправочной станции прекращает подачу топлива по достижении целевого заполнения системы. Давление при этом не превышает 125 % от НРД;

в) третий уровень: заправочная станция оснащена КСД в линии заправки, который будет настроен на инициирование сброса при 10 %-ном повышении максимально допустимого давления заправки (138 % НРД) и на полное открытие при 150 %-ном повышении давления НРД;

г) четвертый уровень: для дополнительной гарантии заправочная станция может иметь резервный предохранительный клапан на раздаточной линии с такими же настройками (или сопоставимые резервные системы). Ожидается, что этот уровень защиты будет установлен строительными/противопожарными требованиями к строительству станций и их периодическими проверками;

д) пятый уровень: бортовые системы хранения должны будут выдерживать 150 %-ное повышение давления НРД вследствие аварии второго уровня на заправочной станции.

В.4 Тепловая защита

В системе должно быть по крайней мере одно устройство сброса давления, активируемое термически, чтобы система обеспечивала контролируемый выброс водорода при воздействии экстремального тепла, которое может повредить баллон или вызвать избыточное давление, или и то, и другое. Предполагается, что термоактивируемое устройство будет срабатывать с соответствующим повышением внутреннего давления или без него и, таким образом, предотвращать разрыв сосуда, вызванный избыточным давлением в нем или его термическим повреждением. Применение клапана сброса давления (в отличие от ТУСД) неприемлемо из-за потенциальной утечки, которая может создать дополнительный риск в замкнутом пространстве; ТУСД не подвержен данному распространенному виду неисправности.

В.5 Срок службы и долговечность

Операторы коммерческого парка ТС, подвергающихся интенсивной эксплуатации, таких как автобусы, запросили проверку способности к безопасной эксплуатации при продолжительном сроке службы. Опыт эксплуатации ограничен 25 годами, поэтому эти требования применяются для квалификации от 15 до 25 лет.

В.6 Выбор материала

Требования к проверке того, что материалы соответствуют проектным требованиям, указанным в данном документе.

В.7 Проверочные испытания

Испытания предназначены для проверки безопасности работы систем в предполагаемых экстремальных стрессовых условиях на дороге. Долговечность баллона при длительном воздействии водорода в течение всего срока службы рассматривается в соответствии с требованиями к эксплуатационным испытаниям в приложении А.2. Испытание на ожидаемую эксплуатацию (см. 5.2.2.2) подтверждает, что система обеспечивает безопасность в наихудших условиях, которые могут возникать в течение всего срока службы ТС. Испытание характеристик долговечности (см. 5.2.2.3) подтверждает, что система является достаточно прочной, чтобы не разрушаться в реальных, но нетипично тяжелых дорожных условиях и при неожиданно интенсивном использовании. Испытания производительности для условий прекращения обслуживания (см. 5.2.2.4) проверяют производительность в тяжелых условиях, при которых прекращается обслуживание. Уровни загруженности, возникающие при эксплуатации, обычно различаются для ТС личного использования и коммерческих ТС большой грузоподъемности.

За наихудшие условия заправки типового ТС принимается срок службы, состоящий из наиболее напряженных заправок от 2 МПа и менее до 125 % НРД, вызывающих максимальное изменение давления и температуры.

Максимальное количество полных заправок в течение ожидаемого срока службы определяется по формуле: (ожидаемый пробег ТС)/(ожидаемый запас хода после полной заправки). Ожидаемый пробег ТС принимают равным 250 000 км. Ожидаемый запас хода ТС на одну полную заправку составляет в среднем 483 км. Ожидаемое количество полных заправок в наихудших условиях, следовательно, составляет 500.

Поскольку нагрузка при полной заправке топливом превышает нагрузку при частичной заправке, проверочное испытание конструкции предусматривает значительный запас дополнительной прочности.

Увеличенная долговечность: экстремальная эксплуатация, когда автомобиль выдерживает повышенное количество заправок.

Превышение ожидаемого количества заправок топливом происходит, если, во-первых, пробег ТС за весь срок службы выше ожидаемого, во-вторых, запас хода ТС на одной полной заправке ниже ожидаемого и/или, в-третьих, средняя заправка ТС не является полной.

Максимальное количество частых неполных заправок определяется как отношение запаса хода к минимальному запасу хода ТС на одну полную заправку, умноженное на минимальную среднюю долю объема заправки за весь срок службы.

Минимальная средняя объемная доля заправки за весь срок службы принята равной 0,33. Надежные статистические данные о текущей объемной доле заполнения отсутствуют, однако они, очевидно, будут зависеть от наличия водородных заправочных станций. Спецификация квалификационных испытаний основана на предположении, что срок службы заправок топливом, требующих менее 33 % запаса топлива, обеспечивает экстремальный показатель, связанный со средним сроком заправок топливом с интервалами от 110 до 160 км.

Запас хода ТС при экстремальном использовании принимается равным 590 000 км.

Минимальный запас хода ТС при полной заправке принимается равным 322 км. В настоящее время все дорожные ТС, выпускаемые ведущими производителями, имеют запас хода на одну полную заправку более 500 км.

Поэтому предельное количество заправок принимается равным 5500 = 3 × 590000/322.

Расчетно-квалификационные требования по прочности (запасу прочности) повышенной долговечности:

- ТС с запасом хода в 322 км на одной полной заправке должен проехать более 1 600 000 км, чтобы потребовалось 5500 полных заправок;

- частичная заправка вызывает заметно меньшие колебания температуры и давления и, следовательно, значительно меньшие напряжения, чем полное заполнение. Проведение высокочастотных циклических испытаний давления при полных заправках топливом с перепадами давления обеспечивает десятикратный запас прочности;

- коммерческие большегрузные ТС (автобусы) — количество циклов заправки/слива топлива для проверочных испытаний.

На проектную аттестацию систем хранения для коммерческого использования в тяжелых условиях влияют, в том числе, два фактора:

а) коммерческие ТС могут подвергаться техническому обслуживанию (например, капитальному ремонту двигателя и трансмиссии), что значительно увеличивает срок службы ТС (дальность пробега) и, таким образом, увеличивает количество заправок топливом в течение ожидаемого срока службы;

б) коммерческие ТС обычно остаются в эксплуатации в течение 15 и более лет. Руководители автопарков обычно требуют сертификацию систем хранения на 20 — 25 лет эксплуатации. Кроме того, коммерческие ТС могут регулярно подвергаться ежедневной заправке от пустого до полного с последующей ночной стоянкой, так что давление и температура топлива не сразу снижаются при последующем вождении. Требования к циклическим испытаниям под давлением коммерческих ТС большой грузоподъемности предполагают следующее:

- количество циклов для испытания на условия ожидаемого обслуживания равно 1000 циклов. Минимум для коммерческих ТС принимается равным удвоенному пробегу личного транспорта, т. е. ожидаемый пробег ТС за весь срок службы составляет 483 000 км;

- количество циклов при испытании на долговечность равно 15 000. Чтобы предусмотреть неограниченное использование, для моделирования непрерывной работы автобуса в течение всего рабочего дня были приняты экстремальные условия — 2 полные заправки в день. Минимальный срок сертификации коммерческих ТС составляет 20 лет; следовательно, минимальное количество циклов испытаний составляет $2 \times 365 \times 20 < 15\,000$. Надежность данного определения обеспечивается тем, что отношение произведения 15 000 циклов и 322 км пробега к заправочному циклу превышает 4 000 000 км пробега.

В.7.1 Базовые требования к производительности

Эти испытания предназначены для того, чтобы:

- обеспечить исходные данные сосудов для дальнейшего использования при аттестации конструкции (см. 5.2.2.2.4 и 5.2.2.3.9);

- обеспечить уверенность в том, что баллоны, представленные для аттестационных испытаний конструкции, сравнимы по своим свойствам;

- предоставить исходные данные, используемые для подтверждения того, что изготовленные системы сопоставимы с системами, используемыми для аттестации для эксплуатации на дорогах в соответствии с требованиями к испытаниям 5.2.2.

В.7.2 Требования к базовым характеристикам — совместимость с водородом

Оценивается склонность к водородному охрупчиванию. Это требование разработано для обеспечения гарантии того, что долговечность баллона (т. е. его восприимчивость к усталостному разрушению в результате циклов изменения давления) проверяется как наихудшее условие. Достаточность испытаний с циклическим гидравлическим давлением подтверждается (или опровергается) квалификацией металлических материалов, контактирующих с водородом (например, металлического корпуса, лейнера или горловиной), на стойкость к водородному охрупчиванию.

Если металлы, используемые в контакте с газообразным водородом в баллоне, подтверждены как прочно устойчивые к водородному охрупчиванию, то гидравлические испытания по 5.2.2.3 достаточны для подтверждения долговечности в отношении усталости при циклическом изменении давления при операциях заправки/слива топлива. Надежная стойкость металлов к водородному охрупчиванию подтверждается либо табличным перечнем в А.2.3 (металлы, для которых признаются экспериментальные данные и опыт использования), либо эксплуатационными испытаниями, указанными в А.3.

Если металлы, используемые в контакте с газообразным водородом в баллоне, не подтверждены как прочно устойчивые к водородному охрупчиванию, но ожидается, что стойкость будет достаточной для конкретного применения, то эта стойкость должна быть подтверждена испытанием сосуда циклическим изменением давления с использованием газообразного водорода, как приведено в А.4.

В.7.3 Требования к базовым характеристикам — сопротивление разрыву под напряжением

Это требование обеспечивает уверенность в том, что баллон имеет достаточную способность противостоять разрыву при выдержке при повышенном давлении и температуре. Критерий приемлемости гарантирует, что минимальное давление разрыва является достаточным для того, чтобы баллон мог держаться в рабочем состоянии при 1,5 × НРД и температуре 85 °С в течение не менее 25 лет, что охватывает длительную стоянку в жарких условиях и условия, которые могут возникнуть в случае множественных сбоев при заполнении ТС. Дополнительная информация приведена в приложении Ж.

В.7.4 Давление разрыва нового баллона

Номинальное давление разрыва вновь изготовленных баллонов устанавливается для трех целей:

1) для проверки того, что изготовленные сосуды соответствуют характеристикам аттестованных по проекту сосудов (см. 5.2.3.2);

2) для проверки того, что вновь изготовленные сосуды имеют первоначальную прочность выше, чем минимальное давление разрыва (см. 5.2.2.1.2.a);

3) для проверки того, что свойства сосудов, соответствующие требованиям к конструкции, не изменяются существенно во время ожидаемой эксплуатации ТС (5.2.2.2.4).

В.7.5 Срок службы нового сосуда под давлением

Минимальный срок службы под давлением вновь изготовленных сосудов устанавливается для трех целей:

1) для проверки того, что изготовленные сосуды соответствуют характеристикам сосудов, отвечающих проектным требованиям (см. 5.2.3.2),

2) для проверки того, что вновь изготовленные сосуды могут поддерживать ожидаемую работу без утечек и либо выйдут из строя из-за утечки (не разрыва), либо не выйдут из строя во время аварийной заправки/слива топлива,

3) для проверки репрезентативности свойств квалифицированных сосудов (срок службы под давлением) для всех выпускаемых изделий.

В.7.6 Испытание ожидаемых эксплуатационных показателей

В течение обычного срока службы ТС его эксплуатация на дорогах приводит к воздействию многочисленных нагрузок, которые последовательно усугубляются своим воздействием; следовательно, способность выдерживать чередующиеся нагрузки является важнейшим элементом проверки работоспособности.

Испытание ожидаемых эксплуатационных показателей (см. 5.2.2.2) проверяет, что система работает в ожидаемых дорожных условиях, таких как заправка топливом, вождение (слив топлива) и парковка; экстремальные температуры также учитываются, поскольку большинство ТС во многих случаях сталкиваются с такими температурами. Кроме того, системы хранения должны выдерживать периодическое превышение давления на заправочной станции. Ожидается, что частота заправки топливом под избыточным давлением будет чрезвычайно низкой, однако подтверждающих статистических данных по этому показателю нет.

Ожидается, что сочетание циклических и статических воздействий давления будет играть роль значительного стресс-фактора. Известно, что циклическое изменение давления инициирует рост трещин в некоторых системах, впоследствии ускоряющийся под действием статического напряжения. Просачивание водорода в условиях статического заполнения ускоряется наличием этих микротрещин. Возможно циклическое изменение давления после статического воздействия водорода, что приводит к напряжению, возникающему не только при циклическом изменении давления.

Использование водородного топлива имеет свои особенности. Колебания температур и проницаемость материала уникальны для водорода.

Можно предупредить неисправности, возникающие в результате взаимодействия циклического и статического воздействия. Например, утечка водорода через микротрещины в лейнере в результате цикличного воздействия экстремальных температур будет ускоряться при статических воздействиях высоких температур и давления. Насыщение водородом материала оболочки баллона на внешней стороне лейнера будет создавать внешнее давление на лейнер, когда содержимое сосуда откачивается при сливе топлива, что может привести к отслаиванию лейнера от оболочки и его повреждению. Разрушение лейнера из-за внешнего давления водорода наблюдалось в экстремальных условиях.

Экстремальные температуры окружающей среды будут значительными факторами стресса. Высокие температуры окружающей среды способствуют проникновению в материал водорода. Возможно в системах может возникнуть утечка только при циклическом изменении давления с газообразным водородом при более высоких температурах окружающей среды. В условиях сверхнизкой температуры окружающей среды дополнительный удар от перепадов давления и температуры при сливе и заправке топливом может серьезно повредить материалы внутренней поверхности и фитинги, которые являются критическими элементами герметичности системы.

Таким образом, чтобы продемонстрировать способность выдерживать ожидаемые эксплуатационные нагрузки, квалификационные испытания конструкции должны включать воздействие сочетания циклического и статического давления водородного топлива при номинальных и экстремальных температурах окружающей среды.

В.7.7 Циклическое изменение давления при номинальной и экстремальной температуре окружающей среды.

Одним из ключевых факторов стресса в системе хранения водорода являются периодические заправки топливом и промежуточные выпуски топлива во время эксплуатации ТС, поскольку система герметизации подвергается колебаниям внутреннего давления и температуры, что способствует проникновению водорода в материалы, структурно гибкие оболочки сосудов, усталостные материалы и подверженные повышенному износу места контакта элементов системы. Нагрузки при заправке, связанные с перепадами давления и температуры, максимальны при полной заправке (от пустого до заполненного объема). Экстремальные условия заправки зафиксированы стандартами протокола заправки для заправочной станции ГОСТ Р 70682 (см. также [1]).

Таким образом, предельным условием заправки будет максимально допустимая скорость заправки по ГОСТ Р 70682, при которой давление водорода в баллоне растет от минимального (пустой баллон) до максимального (заполненный баллон).

Максимальное давление наполнения составляет 125 % (±1 МПа) от НРД, где ±1 МПа — ожидаемая погрешность в точности управления давлением, введена для предотвращения недопустимо избыточного давления.

Минимальное давление составляет (2 ± 1) МПа, если в системе хранения не установлены средства управления, предотвращающие слив топлива при падении давления ниже 1 МПа. Ожидаемая погрешность ±1 МПа обеспечивает достаточную точность регулирования давления для предотвращения недопустимо быстрого сброса давления до слишком низкого давления.

Максимальное напряжение при заправке возникает при быстрой заправке, определяемой протоколом заправки ГОСТ Р 70862; самая быстрая заправка — 3 мин на полную заправку.

Наиболее напряженные выбросы топлива происходят при его самых высоких скоростях, которые происходят в условиях вождения с высоким потреблением мощности или при ручном выбросе во время технического обслуживания или ремонта. Ожидается, что бортовая система хранения выдержит воздействие срабатывания вторичных систем безопасности заправочных станций, состоящих из предохранительных клапанов, настроенных на инициирование сброса при 1,38 × НРД и полное открытие при 1,50 × НРД. Следовательно, все системы должны выдерживать заправку до 1,50 × НРД в течение всего срока службы.

Экстремальные температуры играют важную роль в процессе аттестации.

Циклы изменения давления газообразного водорода в сочетании с экстремальными условиями окружающей среды между циклами обеспечивают воспроизведение условий заправки топливом после интервалов стоянки на открытом воздухе, когда стабилизируется температура. При сверхнизких температурах окружающей среды экстремальный расход топлива (вождение с высокой нагрузкой) приводит к дополнительному снижению температуры, способность выдерживать которое должны продемонстрировать системы. Таким образом, уравновешивание сверхнизких (минус 40 °С) температур проводится с полностью заполненными системами (плотность эквивалентна 1,00 х НРД при 15 °С), чтобы обеспечить максимальный перепад давления и продолжительность высокоскоростного потока во время слива топлива.

Циклы давления газообразного водорода при минус 40 °С проводятся с колебаниями давления от 2 МПа до 0,80 × НРД (± 1 МПа). При минус 40 °С 0,80 × НРД соответствует плотности полного заполнения (1,00 × НРД при 20 °С).

ТС может подвергаться значительному воздействию окружающей среды как при +50 °С, так и при минус 40 °С.

Экстремальные температуры плюс 50 °С и минус 40 °С применяются для испытаний заправки/слива топлива в соответствии с их частотой в окружающей среде.

В.7.8 Показатели парковки — испытание на проникновение и утечку под статическим давлением газа

Температура для испытания на утечку/проницаемость была выбрана не менее 55 °С как экстремальное условие, отражающее длительную стоянку в закрытом помещении, например гараже. Давление полного заполнения при 55 °С составляет 1,15 × НРД.

Как определено в ГОСТ Р 70679, максимально допустимый расход из-за утечки и просачивания из системы хранения водорода установлен на уровне 150 см^3/мин для стандартных легковых ТС, чтобы предотвратить накопление водорода до 25 % его НПВ в небольшом помещении объемом 30,4 м^3 с воздухообменом 0,03 м^3/час. Для более крупных ТС предусмотрено большее допущение, поскольку эти ТС занимают большее пространство, пропорциональное размеру ТС.

Таким образом, максимально допустимый расход для систем составляет R × 150 см^3/мин, где

$$R = \frac{(a + 1) \times (h + 0{,}5) \times (l + 1)}{30{,}4},$$

где a, h и l — ширина, высота и длина помещения соответственно, м.

В качестве альтернативы, системы хранения объемом менее 330 л могут быть предварительно квалифицированы до 46 мл/л/ч по вместимости воды в сосуде вероятных общих объемов баллонов в ТС различного размера.

Также было добавлено требование к проверке на локальную утечку, чтобы она не могла поддерживать горение водорода и впоследствии ослаблять материал и вызывать потерю герметичности. Минимальный расход водорода, способный поддерживать пламя, составляет 0,028 мг/с из типичного компрессионного фитинга, а минимально возможная утечка из миниатюрной конфигурации горелки составляет 0,005 мг/с. Поскольку конфигурация миниатюрной горелки считается «наихудшим случаем», критерий максимальной утечки в Б.7 был выбран равным 0,005 мг/с.

В.7.9 Испытания пробным давлением

Минимальная остаточная прочность, подтверждаемая требованием пробного давления, имеет два обоснования. Во-первых, желателен запас выше 1,50 × НРД на уровне управления неисправностями заправочных станций; 1,80 × НРД превышает ожидаемую максимальную погрешность в 5 % в регулировке и отклике КСД. Во-вторых, вероятность разрушения материалов с наихудшими показателями сопротивления разрыву под напряжением под нагрузкой при 1,80 × РД в течение 5 мин выше, чем его вероятность при выдержке 1,50 × НРД в течение 10 ч. Этого времени достаточно для охлаждения, чтобы уменьшить избыточное давление, или других корректирующих действий для сброса избыточного давления. В более ранних стандартах требовалось, чтобы системы хранения демонстрировали аналогичную остаточную прочность на разрыв 1,8 × НРД.

Продемонстрированная способность выдерживать воздействие 1,80 × НРД в конце серии испытаний на ожидаемый срок службы обеспечивает остаточную прочность после комплекса воздействий ожидаемого срока службы. Анализ наихудшего случая усталости волокон (см. 5.2.2.3.6) показывает, что вероятность устойчивости системы при 1,80 × НРД в течение 5 мин эквивалентна таковой при 10-часовом воздействии 1,50 × НРД.

В.7.10 Испытания на разрыв

Требование снижения среднего давления разрыва новой системы хранения (не подвергавшейся статическому или циклическому испытанию под давлением) не более чем на 20 % заключается в обеспечении стабильности прочности конструкции на разрыв в течение срока службы.

В.7.11 Долговечность при длительной эксплуатации в экстремальных условиях

Серия испытаний на долговечность разработана для демонстрации прочности на разрыв в сочетании с экстремальными условиями эксплуатации, выходящими за рамки тех, с которыми сталкивается ТС в типичных условиях эксплуатации, чтобы обеспечить надежную гарантию стойкости к разрыву. Эта серия может выполняться гидравлически (то есть с отдельно взятым сосудом), поскольку она ориентирована на снижение прочности конструкции баллона.

Воздействие окружающей среды включает в себя внешние механические повреждения, связанные с износом навесного оборудования ТС, а также в результате химического воздействия активных компонентов, так или иначе встречающихся в процессе эксплуатации (к примеру, кислотный дождь, слякоть, аккумуляторная кислота).

В.7.12 Испытание на удар

Ожидается, что баллоны могут выдержать повреждения во время установки, риск которых предполагается на отдельных ремонтных предприятиях послепродажного обслуживания. Системы должны надежно работать после падения с полностью выдвинутого вилочного погрузчика перед установкой в ТС.

В.7.13 Испытание на поверхностное повреждение

Химическое воздействие имитирует экстремальное воздействие коррозионно-активных веществ (кислоты и основания) и химически активных материалов, присутствующих в дорожной среде. Перед химическим воздействием по изделию наносятся сфокусированные удары, имитирующие максимально возможное в дорожных условиях воздействие каменной крошки, способной проникнуть сквозь защитное поверхностное покрытие. Кроме того, баллоны подвержены поверхностным механическим повреждениям (например, возможному истиранию в местах прикрепления).

Перед испытанием на химическую стойкость стенка сосуда высокого давления должна быть подвергнута поверхностным повреждениям путем разрезания, истирания и прокола. Повреждение поверхности должно включать проколы поверхностного слоя большего размера, чем в пределах производственных допусков, и соответствующие силе удара дорожного гравия.

В.7.14 Испытания на химическую стойкость

Поврежденные в результате прокола участки стенки баллона высокого давления следует подвергнуть обработке теми химическими веществами, которые находятся в эксплуатационной окружающей среде, в том числе на борту ТС. После 48 часов воздействия веществ защитную оболочку следует осмотреть, чтобы убедиться, что на стенке баллона нет повреждений, кроме тех, которые были нанесены при первоначальном ударе (см. Б.10).

В.7.15 Заправка топливом при сверхвысоком давлении — циклическое превышение давления при температуре окружающей среды

Ожидается, что водородные заправочные станции должны будут иметь избыточные последовательные устройства сброса давления, которые активируются при 1,38 × НРД и полностью открываются до 1,50 × НРД. Заправочные станции необходимо заблокировать до тех пор, пока источник избыточного давления не будет устранен, что позволяет считать ожидаемые выходы станций из строя редкими. Тем не менее, шанс возникновения избыточного давления сохраняется, и в наихудшем случае предполагается десять таких случаев в течение срока службы ТС, что учитывается в процессе аттестации конструкции.

В.7.16 Предельная устойчивость при парковке — испытание статическим давлением при высокой температуре

Продемонстрированная способность выдерживать более 15 лет стоянки при номинальном полном заполнении, 1,00 × НРД при 15 °С, необходима для учета ТС, которым часто приходится длительное время парковаться при заполненной системе хранения. Основное внимание в требованиях уделяется отсутствию разрыва из-за структурной усталости, хотя до настоящего времени не было сообщений о разрушении сосуда из-за разрушения под напряжением при эксплуатации на дорогах, однако имеются случаи разрушения сосуда из композитного стекловолокна из-за усталости в условиях эксплуатации, в присутствии сильных коррозионных веществ (работа при коррозионном воздействии рассматривается в 5.2.2.3.3 и 5.2.2.3.4). Также известны случаи структурной усталости после повреждений, вызванных износом, связанным с неправильной установкой, после повреждений в автокатастрофах, а также сосудов, используемых на военной службе, прошедших неизвестные квалификационные испытания и бывших в эксплуатации сверх ожидаемого срока службы.

В идеальном случае квалификационное испытание эксплуатационных характеристик требует выдерживания сосуда при 100 % НРД в течение более 15 лет без разрыва; однако 15-летний срок испытаний, очевидно, невозможен, поэтому разработано ускоренное испытание. Оно предназначено для обеспечения эквивалентности вероят-

ности разрыва под напряжением при испытаниях либо при 100 % НРД в течение более 15 лет, либо при 125 % НРД в течение 1000 часов.

Анализ данных о разрывной нагрузке композитных волокон показывает, что в худшем случае (композитные нити, отвержденные стеклом/смолой) вероятность разрыва под напряжением через 25 лет при номинальном напряжении НРД меньше или равна вероятности разрыва под напряжением через 1000 часов при более высоком на 25 % напряжении. (Для углеродных композитных нитей эквивалентность 1000 часов при номинальном напряжении 125 % составляет более миллиарда лет при номинальном напряжении.) Поскольку вероятность разрыва при напряжении в пучке достаточно успешно совпадает с распределением Вейбулла, график зависимости логарифма уровня напряжения от логарифма времени до разрыва является линейным, с одинаковым наклоном независимо от начального уровня напряжения (т. е. независимо от расположения сегмента нити в схеме намотки). Следовательно, наклон линии, связывающей напряжение (давление) со временем, может прилагаться как ко всей системе, так и к отдельным сегментам нити. Если рассматривать наклон такой прямой для стеклокомпозитных нитей как наихудший допустимый случай по характеристике разрыва под напряжением, вероятность этого разрыва через 25 лет при 1,00 × НРД эквивалентна 1000 часам при 1,25 × НРД.

Примечание — Когда производительность лучше, чем в наихудшем случае, время до поломки при 1,00 × НРД составляет много больше 25 лет.

Для подтверждения того, что испытание парковочных характеристик 5.2.2.3.6 является оценкой наихудшего случая, базовые требования к характеристикам [(см. 5.2.2.1.1, перечисление б)] обеспечивают проверку того, что сосуды проявляют меньшую чувствительность к разрушению при статическом напряжении, чем наихудший случай, описанный выше наклоном прямой зависимости, используемой в разработке 5.2.2.3.6 (данные о композитной нити стекло/смола).

В качестве дополнительной гарантии, усталость материалов также ограничивается требованиями к остаточной прочности в конце серии испытаний 5.2.2.3. В наихудшем случае, при котором стеклянный композит будет иметь небольшую остаточную прочность после 1000 часов воздействия 125 %-ного номинального напряжения (т. е. находиться на грани разрыва), новая система выйдет из строя с той же вероятностью при более чем на 30 % высоком напряжении, следовательно, для исключения систем, находящихся на грани отказа, сразу после прохождения серии циклических испытаний 5.2.2.3, разница между новой системой и системой, подвергшейся 125 %-ной номинальной нагрузке в течение 1000 часов, не должна приближаться к 30 %. Действительно, снижение конструкционной целостности примерно на 30 % по сравнению с ожидаемым сроком службы было сочтено неприемлемым в критически важных для безопасности ТС областях, даже если остаточная прочность соответствовала возможному воздействию давления, поэтому консервативное требование ограничить снижение прочности на разрыв до менее 20 % было принято в качестве требования к остаточной прочности (см. 5.2.2.3.9). Кроме того, сосуды должны соответствовать требованиям к характеристикам в конце срока службы, а именно способности выдерживать 150 %-ное избыточное давление в течение 10 ч; следовательно, эквивалентное требование к испытанию (см. 5.2.2.3.8) продолжительностью 4 мин при 180 % НРД налагается в качестве дополнительного требования к остаточной прочности.

Учитывая ожидаемый диапазон разрывного давления в производственных единицах (регулируемый в пределах ±10 % от BP_{DQ} (см. 5.2.3.2), допуск на 20 % снижения измеренного давления разрыва по сравнению с BP_{DQ} (см. 5.2.2.1.2.а) соответствует 10 %-ному снижению для самого слабого сегмента продукции, который имеет начальное давление разрыва на 10 % ниже давления разрыва. При подтвержденной стойкости на усталость при воздействии 1,25 × НРД даже самый слабый сегмент продукции будет иметь сопоставимую вероятность выдержать 25 лет статического воздействия при НРД.

Утверждение температуры испытаний 85 °С основано на трех факторах:

- процедура испытаний должна установить, что система способна выдерживать длительное воздействие температуры 85 °С при максимальном давлении; 85 °С — предельная температура заправки топливом 70 МПа;
- процедура испытаний должна установить, что система может выдерживать воздействие температуры 85 °С, максимально допустимую температуру окружающей среды. Температура под капотом плюс 82 °С была измерена в ТС темного цвета, припаркованном на асфальте под прямыми солнечными лучами при температуре окружающей среды 50 °С. Кроме того, баллон со сжатым газом, окрашенный в черный цвет, без дополнительной защиты, в кузове черного пикапа под прямыми солнечными лучами при температуре окружающей среды 49 °С имел максимальную/среднюю измеренную температуру поверхности 87 °С / 70 °С;
- во многих системах наблюдается аррениусовская зависимость скорости химических процессов от температуры. Скорость окислительного износа смол по Аррениусу удваивается при повышении на 10 °С, а повышение с 15 °С до 85 °С соответствует 27-кратному увеличению скорости окисления; таким образом эквивалентное 15 годам воздействие обеспечивается за 1000 часов испытаний.

Надежность требования заключается в том, что испытания на разрыв под напряжением при оценке вероятности разрыва эквивалентно 25-летнему воздействию в условиях полного заполнения при постоянном воздействии ускоряющего воздействия экстремальной температуры 85 °С. Эти условия являются наиболее экстремальными для эксплуатации легковых автомобилей.

Для коммерческих ТС большой грузоподъемности (например, для автобусов) предусмотрено еще одно экстремальное условие, поскольку автобусы автопарка обычно возвращаются в центральное депо. Наиболее экстремальные условия при парковке могут возникнуть, когда ТС ежедневно в течение 20 лет подвергается полной заправке топливом до 1,25 × НРД, после чего простаивает 2-3 часа для охлаждения. При отсутствии вождения после заправки топливом, если предположить, что максимальное время возврата к НРД составляет 2-3 часа, такое ТС будет испытывать нагрузку суммарное время, эквивалентное 1 году при более чем 1,00 × НРД. Вероятность разрыва (вследствие усталостного разрушения материала при наихудших условиях, в частности, содержащего в основном нити из стекла/смол) через 1 год при 1,25 × НРД меньше, чем вероятность разрыва при 135 % в течение 1000 часов. Таким образом, ускоренное испытание на разрыв, необходимое для аттестации конструкции, представляет собой демонстрацию отсутствия разрыва в течение 1000 часов при 1,35 × НРД.

В.7.17 Рабочие характеристики в условиях прекращения эксплуатации

Требования к рабочим характеристикам в условиях прекращения эксплуатации представляют собой демонстрацию снижения риска за счет предотвращения разрыва в условиях повреждения защитной оболочки.

В.7.18 Испытание на локальное воздействие пламени и расширенное испытание на огнестойкость

ТУСД в системе должно контролируемо сбрасывать давление до того, как система выйдет из строя (взорвется) под воздействием огня. Указания к проектированию и установке приведены в 5.2.1.3, 5.2.4.3 и 5.2.4.4. Часть испытания, в котором изделие подвергают воздействию охватывающего пламени, в сочетании с требованиями к функции ТУСД, приводит к снижению частоты разрывов, вызванных пожаром, при эксплуатации на дорогах. Требования к противопожарным характеристикам должны быть оценены дополнительно.

Требование установлено в целях снижения риска, возникающего в результате аварии с участием нескольких ТС, когда бензин из других ТС в результате повреждения бензобака попадает в область под ТС, работающим на водороде, и воспламеняется, образуя широкий источник тепла.

Система должна выдерживать воздействие локализованного возгорания, не охватывающего ТУСД, в течение времени, соответствующего развитию огня от локального до полностью охватывающего.

В.7.19 Испытания на удар при высокой скорости деформации

Это испытание предназначено для демонстрации изделием способности выдерживать прямое пулевое попадание, что сопровождается высокой скоростью деформации порядка 10^2 — 10^4 $с^{-1}$. Проходной критерий отсутствия разрыва означает, что баллон остается неповрежденным, при этом пробоина и/или мелкие осколки в зоне попадания пули не считаются неисправностью баллона.

Вариант испытания № 1 представляет собой традиционную стрельбу с использованием

стандартной бронебойной пули калибром 7,62 мм. Диаметр пули 7,62 мм является репрезентативным вследствие своей распространенности и стандартизирует размер отверстия и энергию удара для испытаний. Номинальная скорость и максимальное расстояние стрельбы обеспечивают согласованность выполнения испытания.

Вариант испытания № 2 представляет собой альтернативный метод проведения испытания на удар при высокой скорости деформации без применения огнестрельного оружия. Выбор материала снаряда (сталь) основан на материале сердечника бронебойного снаряда, указанного в варианте № 1. Выбор диапазона диаметров снаряда основан на диаметрах стального сердечника (нижняя граница) и самой пули (верхняя граница). В зависимости от конструкции баллона это может быть пуля, часть пули или ее сердцевина, которая непосредственно проникает в баллон.

Этот диапазон диаметров охватывает множество возможностей и обеспечивает гибкость конструкции снаряда. Диапазон масс представлен нижней границей (представляет собой массу стального сердечника) и верхней границей (представляет собой массу самой пули).

Угол наклона носовой части определяет геометрию снаряда, эквивалентную геометрии сердечника пули. Указанная номинальная скорость соответствует требованиям к скорости метода испытаний варианта № 1. Минимальное энергопотребление обеспечивает возможность выбора альтернативного диаметра снаряда и метода приведения снаряда в движение, основанного на соотношении массы, скорости и энергии. Твердость снаряда следует обеспечивать использованием соответствующей стали.

В.7.20 Частичное освобождение систем от испытаний

Испытание (пневматическое) ожидаемых эксплуатационных характеристик (см. 5.2.2.2) подтверждает, что внутренняя часть защитной оболочки способна выдерживать ожидаемые эксплуатационные характеристики ТС без утечек, а также что эксплуатационные испытания долговечности (гидравлические) (см. 5.2.2.3) прежде всего подтверждают способность системы функционировать в условиях чрезвычайной ситуации без сбоев. Неметаллические лейнеры действуют как барьеры от утечки и проникновения, однако все металлические элементы системы хранения требуют проверки на утечку, разрыв и огнестойкость, поскольку они часто бывают несущими и теплопроводными. Изменения по части ТУСД и/или в компонентах ТС, не включенных в систему хранения сжатого водорода, но которые влияют на пожарную безопасность, должны быть переквалифицированы для пожарной безопасности, но не связаны с устойчивостью компонентов системы к разрыву и утечке, и не требуют аттестации в соответствии с 5.2.2.2 или 5.2.2.3, поскольку ТУСД должно быть отдельно квалифицировано как компонент, устойчивый к разрыву и утечке.

В.8 Испытания в рамках контроля качества продукции

В.8.1 Серийное производство

Эти требования к контролю качества производства соответствуют традиционным требованиям, используемым для хранения сжатого газа на ТС.

В.8.2 Производственная партия

Эти требования к контролю качества производства соответствуют традиционным требованиям, используемым для хранения сжатого природного газа, за тремя исключениями:

- размеры партий;
- требование контроля давления разрыва на уровне более 1,80 × НРД и более 90 % BP_{DQ}, номинального расчетного давления разрыва, проверенного во время аттестации конструкции, подтверждает, что производство соответствует этой квалификации. Значение запаса в ± 10 % появилось в результате оценки наихудших случаев усталости композитного материала в системах с уменьшенной на 10 % начальной прочностью на разрыв по сравнению с требуемыми характеристиками;
- требование об ограничении изменчивости срока службы при циклическом изменении давления, а также о регистрации мер по контролю этих изменений в системах, испытанных при аттестации проекта, в случаях, когда срок службы при циклическом изменении давления меньше двукратного количества циклов, требуемых для 5.2.2.1.3. Это требование гарантирует, что системы, спроектированные с максимальным уровнем производительности, будут производиться с соответствующим низким уровнем рентабельности производства. Например, для систем с НССЦД равным 1,33 циклов, требуемых для 5.2.2.1.3, изменчивость срока службы под давлением должна быть более 25 %.

В.8.3 Ограничения в обслуживании

Требования раздела А.2 касаются химического взаимодействия газообразного водорода с системой хранения и топливной системой. Системы, прошедшие испытание на гидравлическую устойчивость (такие как 5.2.2.3, где баллон испытывает воздействие физических нагрузок), не подвергаются воздействию химических явлений, в т.ч. водородной усталости. В приложении А.2 рассматривается долговечность элементов систем хранения и топливных систем, находящихся в контакте с газообразным водородом, т. е. в приложении рассматривается возможность ухудшения механических свойств металлических компонентов при воздействии газообразного водорода.

Приложение А.2 содержит ссылку на методы (см. А.3 и А.4) для аттестации компонентов затворов и баллонов или составляющих их металлических сплавов для использования в системах хранения. Основное внимание при проверке совместимости уделяется способности материалов сохранять свои прочностные свойства в атмосфере газообразного водорода, не создавая риска утечки или разрыва.

Последовательность требований для аттестации баллонов высокого давления в части совместимости материалов с водородом показана на рисунке В.1.

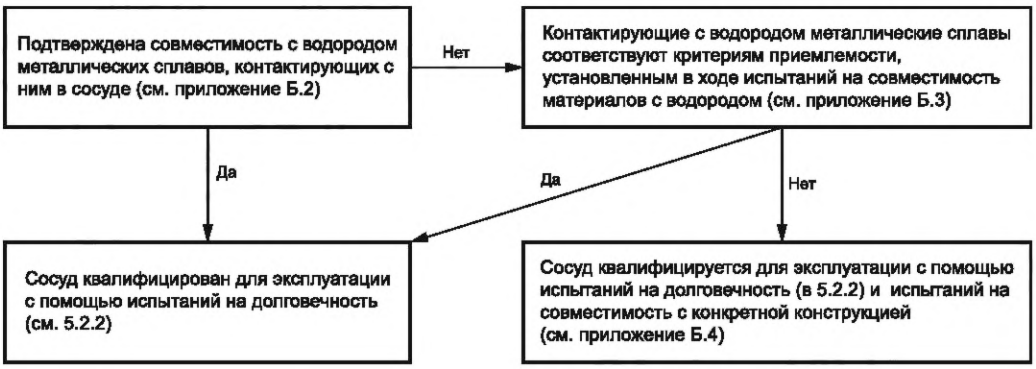


Рисунок В.1 — Процесс квалификации на совместимость с водородом

Металлические сплавы могут быть квалифицированы для использования с водородом посредством процедур испытаний материалов, приведенных в приложении А.3. Эти процедуры основаны на методах испытаний для оценки совместимости с водородом в условиях экстремальной температуры и давления, характерных для систем хранения газообразного водорода, предназначенных для эксплуатации на дорогах. Рекомендации по материалам представлены в таблице А.2, а процедуры испытаний в А.3.

Традиционные требования к совместимости топливопроводов с водородом применяются к трубопроводам ТС и другим устройствам низкого давления, подверженным воздействию давления и температуры с продолжительностью, соответствующей условиям применения, для которых эти стандарты были разработаны. Компоненты топливной системы и трубопроводы, как правило, разрабатываются с расчетом на долговечность в условиях ТС, поэтому низкое внутреннее давление водорода соответствует низким нагрузкам.

Долговечность баллона, работающего под давлением водорода, не полностью подтверждается пневматическими испытаниями по 5.2.2.2, не включающими 2 × N_D с газообразным водородом, потому что требовать регулярного квалификационного испытания продукта такой продолжительности, которая мешает внедрению нового продукта по ежегодному графику, нецелесообразно. Проверка того, что водород не снижает долговечность защитной оболочки, может быть достигнута путем оценки материалов конструкции (см. А.3) или полномасштабными пневматическими испытаниями до 2 × НД (см. А.4).

В таблице А.2 приведены рекомендации по выбору материалов для работы с водородом. В таблице А.2 указаны металлические сплавы, для которых уже имеются значительные экспериментальные данные из опубликованной научной литературы и из исторического опыта использования материалов в сравнимых применениях с газообразным водородом. Металлические сплавы и условия, при которых их использование обычно считается приемлемым, перечислены в таблице А.2 на основе успешного применения этих материалов в дорожных и стационарных условиях. Это руководство может быть пересмотрено по мере необходимости, чтобы отразить результаты испытаний, проводимых в соответствии с приложением А.3.

В соответствии с настоящим стандартом, основным фактором, учитываемым при проектировании топливных систем ТС, в первую очередь, должны быть усталостные характеристики. В отсутствие данных об усталости материалов в газообразном водороде для установленного диапазона рабочих температур от минус 40 °С до 85 °С исторически использовалось значение пластичности при растяжении для оценки совместимости материалов. Содержание никеля является критически важным фактором в повышении пластичности при растяжении аустенитных стальных сплавов в водородных средах. На рисунке В.2 показано относительное уменьшение площади после испытания на растяжение в зависимости от содержания никеля. Поскольку в сплавах с содержанием никеля менее 13 % наблюдается снижение пластичности при растяжении в газообразном водороде при минус 50 °С, минимальное содержание никеля 13 % представляет собой классическую рекомендацию для материалов, не подверженных деградации при работе с водородом. Современные данные показывают отсутствие значительного ухудшения предела выносливости в газообразном водороде для аустенитных нержавеющих сталей с содержанием никеля менее 13 %. Таким образом, конструкции с бесконечным сроком службы (с расчетным напряжением меньше предела выносливости) не будут показывать ухудшения усталостных характеристик этих сплавов при работе с водородом.

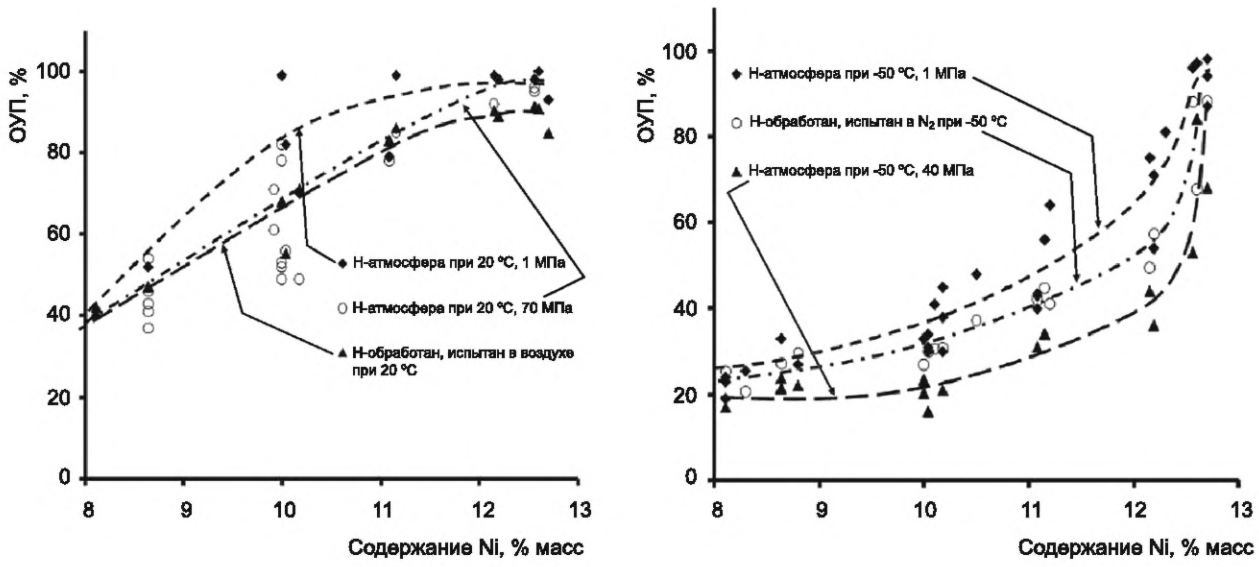


Рисунок В.2 — Влияние содержания никеля на пластичность (относительное уменьшение площади (ОУП) при растяжении)

В.8.3.1 Ограничение по азоту для аустенитных нержавеющих сталей.

Совместимость с водородом ухудшается при более высокой концентрации азота. Рекомендуемый предел концентрации азота составляет менее 0,25 % (по весу) (см. [7]).

В.8.3.2 Ограничение по дельта-ферриту для аустенитных нержавеющих сталей

Ферритные фазы ухудшают совместимость с водородом аустенитных нержавеющих сталей. Предусмотрено ограничение содержания дельта-феррита до менее 3 % (по объему) для обеспечения приемлемой совместимости с водородом (см. [8]).

В.8.3.3 Алюминиевые сплавы, подверженные воздействию сухого газообразного водорода

Нет никаких доказательств того, что сухой молекулярный газообразный водород влияет на алюминиевые сплавы (см. [9]).

В.8.3.4 Алюминиевые сплавы, подверженные воздействию влажного воздуха.

Многие высокопрочные алюминиевые сплавы подвержены коррозионному растрескиванию под напряжением в условиях влажного воздуха. (см. [10]).

В.8.3.5 Ограничения по напряжению

Базовая стойкость к росту трещин под усталостным напряжением в металлических горловинах, металлических лейнеров и металлических цилиндров без оболочки во время эксплуатации подтверждается первым требованием минимального разрыва 2,00 × НРД (см. 5.2.2.1.2) и вторым требованием отсутствия разрыва или утечки после 2 × N_D (125 % НРД) (см. рисунок 4). Дополнительным классическим требованием для металлических лейнеров в баллонах с композитной оболочкой является выдерживание 1,50 × НРД, что примерно соответствует нагрузке (при НРД) менее предела выносливости материалов. Кроме того, предел выносливости аустенитных нержавеющих сталей не изменяется при испытаниях в водороде под высоким давлением (в основном сплавы с содержанием никеля менее 13,0 %).

В.8.3.6 Испытания материалов на совместимость с водородом высокого давления

Системы хранения сжатого водорода должны быть совместимы с газообразным водородом во всех применяемых диапазонах давления и температуры. Испытание на медленную скорость деформации (ИР) и испытание на усталостную долговечность (А.3.2 и А.3.3 соответственно) предназначены для подтверждения того, что конструкционные материалы обладают достаточной совместимостью с предполагаемыми условиями эксплуатации. ИР оценивает, сохраняют ли конструкционные металлы свои прочностные свойства в газообразном водороде при низкой температуре. Испытание на усталостную долговечность определяет, что металлы обладают достаточными характеристиками усталостной долговечности в газообразном водороде при соответствующих приложенных напряжениях (1,25 НРД) и наихудшей температуре. Показатели, полученные при оценке испытаний, должны гарантировать актуальность квалификационных испытаний на долговечность с использованием циклов гидравлического давления для работы с газообразным водородом. Эти испытания не предназначены для обеспечения проектных данных.

В общем случае выбор материалов должен определяться спецификацией материалов, в которой указаны диапазоны состава и указаны минимальные свойства при растяжении. Допустимые расчетные напряжения определяются из заданных минимальных прочностных свойств материала. Подтверждение того, что материал соответствует своему назначению, может быть основано на сертификации предприятия или на основе испытаний, проведенных производителем или другой уполномоченной организацией. Проверочные испытания проводятся в лабораторном воздухе.

В.8.3.7 Условия воздействия водорода

Квалификационные испытания проводятся в среде газообразного водорода. Результаты испытаний на разрыв при растяжении показывают, что испытания в газообразном водороде являются более жесткими, чем альтернативные испытания, например испытания образцов, предварительно обработанных водородом.

Порядок деструкции образцов для ИР, испытанных в газообразном водороде, включает образование поверхностной трещины с последующим ее распространением по диаметру образца с присутствующим на поверхности газообразным водородом. Разрастание поверхностной трещины ускоряется присутствием водорода, ухудшающего пластичность при растяжении, однако трещины за счет пластичности демонстрируют рост и сами по себе. Ускорение роста поверхностной трещины происходит при относительном растяжении на более, чем 10 % для нержавеющей стали, испытанной в газообразном водороде при давлении 95 МПа и при комнатной температуре. Испытания образцов, предварительно обработанных водородом, менее строги из-за возможного выделения водорода с поверхности при изначальном его отсутствии в окружающей атмосфере.

Минимальное испытательное давление должно составлять 1,25 × НРД, чтобы обеспечить учет эффектов давления. Можно проводить испытания при более высоком давлении (более 1,25 НРД) — например, данные испытаний при 100 МПа можно использовать для квалификации материалов в системе с НРД при 70 МПа, поскольку испытательное давление должно быть 87,5 МПа.

Небольшие количества газовых примесей (например кислорода) могут оказывать существенное влияние на измеряемые характеристики. Различные соединения, в частности, кислород, адсорбируются на поверхности испытуемого образца и препятствуют проникновению в него водорода во время испытания, влияя на рост усталостных трещин и прочие характеристики.

Диапазон температур испытаний для ТС обычно составляет от минус 40 °С до плюс 85 °С. Экспериментальные данные показывают ухудшение пластичности при растяжении при низких температурах в некоторых стальных сплавах. Увеличенная потеря пластичности аустенитных сплавов нержавеющей стали в водороде при низкой температуре (менее минус 45 °С) показана на рисунках В.2 и В.3. Для аустенитных нержавеющих сталей и сплавов на основе никеля рекомендуется температура ИР минус 45 °С, чтобы зарегистрировать эти эффекты. Для цветных металлов комнатной температуры достаточно, чтобы зафиксировать потерю пластичности в водороде, в то время как для сталей рекомендуется проводить испытания как при комнатной температуре, так и при низкой, пока не будет установлена температура, ограничивающая рабочие характеристики. Усталостная долговечность аустенитных сталей обычно улучшается с понижением температуры в связи с повышением прочности (см. рис. В.5). С учетом вышесказанного, рекомендуется проводить испытания сталей на усталостную долговечность как при комнатной температуре, так и при низкой.

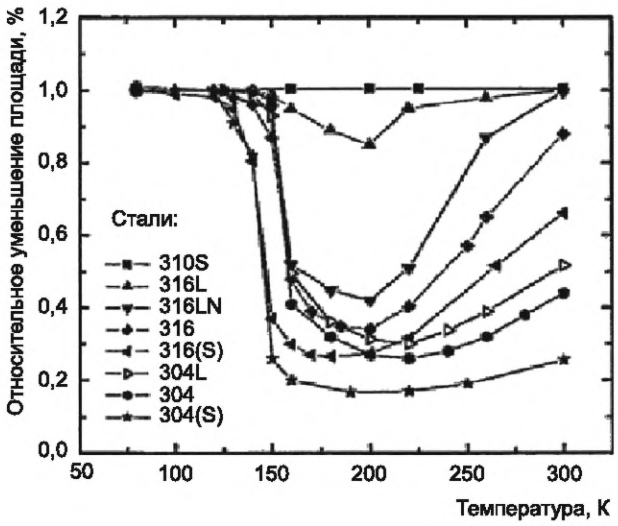


Рисунок В.3 — Результаты испытания различных сталей при медленной скорости деформации (ИР)

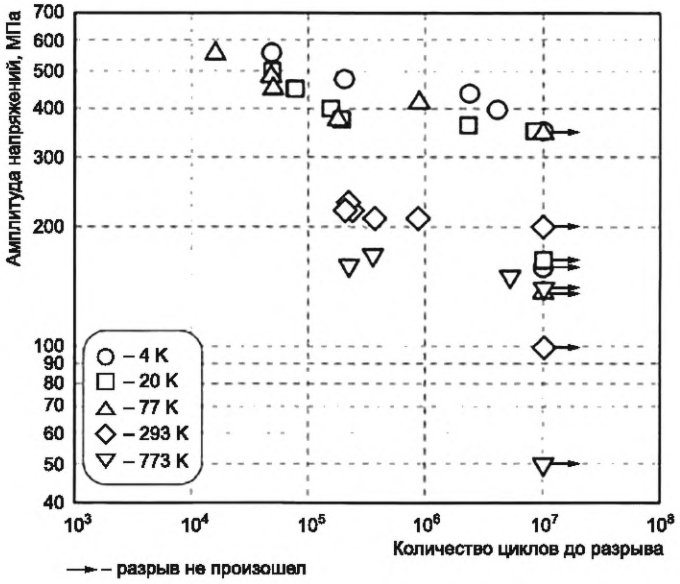


Рисунок В.4 — Данные по усталостной долговечности нержавеющей стали типа 304L, испытанной в средах жидкого гелия (4 К), жидкого водорода (20 К), жидкого азота (77 К) и температуры окружающей среды (293 К и 773 К)

Целью испытания на медленную скорость деформации (ИР) является проверка стойкости материала к полному разрыву в атмосфере водорода, анализ разрушений, отличных от усталостных (см. А.3.3), и проверка заданных минимальных прочностных свойств в наихудших случаях воздействия водородной среды.

Для обеспечения проникновения водорода внутрь образца рекомендуется, чтобы диаметр испытуемого образца был ограничен 8 мм.

Предполагается скорость деформации наихудшего случая менее 10^{-4} $с^{-1}$.

В соответствии с назначением ИР критерии приемки обеспечивают соответствие прочностных свойств требованиям спецификации материалов; как правило, допустимые расчетные напряжения выводятся из минимальных прочностных характеристик, определенных спецификацией материалов (усталость и другие факторы могут уточнять допустимые расчетные напряжения). Кроме того, требование способности к деформационному упрочнению

1,07 (> 0,935) устанавливает минимальную остаточную пластичность для высокопрочных материалов. Точно так же эмпирически определенное минимальное удлинение 12 % основано на допустимости использования материалов в компонентах, подверженных высокому давлению.

Целью испытания на усталостную долговечность является проверка того, что материалы демонстрируют достаточную усталостную долговечность при высоких напряжениях. Типичная зависимость между амплитудой приложенного напряжения и количеством циклов до разрушения называется кривой многоцикловой усталости. Амплитуда напряжения в точке перегиба кривой называется пределом выносливости. Метод испытания определяет простые показатели усталостной долговечности, характерные для аустенитных нержавеющих сталей, обычно используемых в среде газообразного водорода, например типа 316L. Усталостная долговечность (количество циклов до разрушения) оценивается при максимальном приложенном напряжении, равном 1/3 от предела прочности материала. Для обычных аустенитных нержавеющих сталей напряжение при 1/3 предела прочности при растяжении может быть больше, чем предел текучести, но, как правило, будет меньше предела выносливости материала (где предел выносливости представляет собой напряжение, при котором количество циклов до разрушения составляет более 10000000 циклов при полностью реверсивном нагружении). Для обычных аустенитных нержавеющих сталей количество циклов в точке перегиба составляет около 200000 циклов как в газообразном водороде, так и в воздухе.

Допускаются два варианта испытаний на усталость:

- цельные образцы, подвергнутые циклическому изменению нагрузки при коэффициенте нагрузки –1 (отношение минимальной приложенной нагрузки к максимальной, обозначаемое как R);
- образцы с надрезом, подвергнутые циклическому изменению нагрузки при R = 0,1.

В обоих случаях испытание на усталость проводят при максимальном приложенном напряжении, равном 1/3 от предела прочности материала на растяжение S_{UTS}. Для цельного образца амплитуда напряжения эквивалентна 1/3 S_{UTS}, а диапазон напряжений (разница между максимальным и минимальным напряжениями) удваивает это значение, определяя жесткие границы номинальных напряжений в компоненте. Для образца с надрезом максимальное номинальное напряжение также составляет 1/3 S_{UTS}, а приложенная нагрузка представляет собой растягивающее напряжение, соответствующее номинальным напряжениям в системах, работающих под давлением. Помимо прочего, надрез образца осуществляют для оценки чувствительности материала к концентрациям напряжений в присутствии водорода. На рисунке В.6 показаны циклы напряжения для цельных образцов и для конфигурации с надрезом.

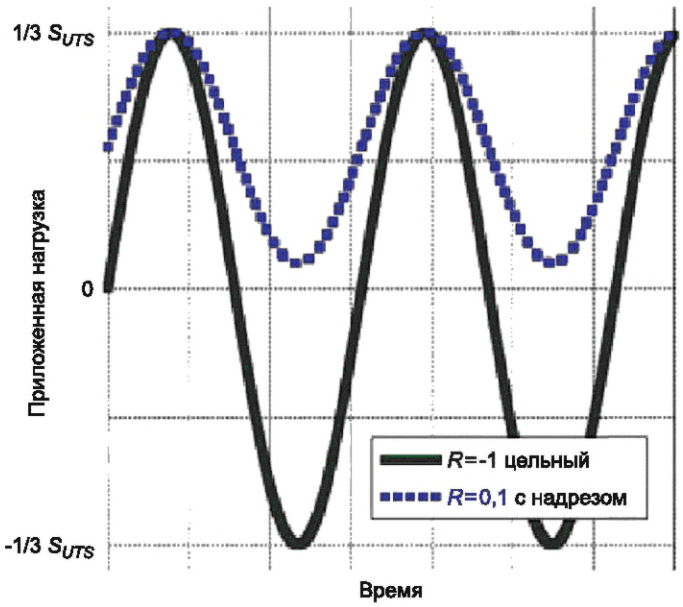


Рисунок В.5 — Схема циклов напряжения для испытаний на усталостную долговечность

В.8.3.8 Приемочные критерии

Критерии приемлемости для усталостной долговечности выполняются в том случае, если усталостная долговечность материала при относительно высоком напряжении близка к бесконечной в контексте применения в ТС. Для обоих вариантов нагрузки три образца должны выдержать 200000 циклов до разрушения при предписанном максимальном приложенном напряжении 1/3 S_{UTS}. Отсутствие разрушения всех трех образцов позволяет принять вероятность разрушения равной нулю и заключить, что 200000 циклов соответствуют количеству циклов в точке перегиба для цельного образца из обычных отожженных аустенитных нержавеющих сталей. Испытания могут быть

прекращены после 200001 цикла, если образец не вышел из строя. Испытание цельного образца на усталостную долговечность должно выявить отсутствие снижения предела усталости в атмосфере газообразного водорода под высоким давлением. Для облегчения испытаний образцов с надрезом и сокращения их времени допустимо уменьшение количества требуемых циклов до 100000, однако в этом случае для подтверждения эксплуатационных характеристик материалов потребуются дополнительные образцы: всего должно быть испытано 5 образцов, все они должны выдержать не менее 100000 циклов до разрушения. Материалы образцов с надрезом, прошедшие от 100000 до 200000 циклов нагрузки до разрушения, считаются приемлемыми при условии, что все испытанные образцы (минимум 5) успешно прошли более 100000 циклов. Следует учесть, что кривые усталостной долговечности различных нержавеющих сталей имеют большее число циклов до разрушения в газообразном водороде, чем отожженные аустенитные нержавеющие стали типа 316L, при той же приложенной нагрузке.

При приведенных к S_{UTS} нагрузках аустенитные нержавеющие стали демонстрируют аналогичные характеристики (около 100000 циклов до разрушения) при напряжении более 1/3 S_{UTS}.

Сварные швы должны быть аттестованы с использованием процедур, приведенных в приложении А.3, поскольку сварные швы потенциально подвержены водородному охрупчиванию. Существуют данные о пагубном влиянии феррита в концентрациях от 2 до 7 объемных процентов при высоких концентрациях водорода.

В.8.3.9 Испытание металлов на совместимость с водородом для конкретных конструкций

Протокол испытаний (см. приложение Ж) обеспечивает оценку повышенной склонности к неисправностям в присутствии газообразного водорода в наихудших условиях эксплуатации на дороге для конкретной конструкции сосуда. Испытание производительности фокусируется на циклическом изменении давления с водородом в качестве рабочей среды.

В.8.3.10 Температурные ограничения

Протокол заправки топливом для систем на 70 МПа рекомендует использовать топливо с температурой минус 40 °С во многих условиях окружающей среды для полной заправки в течение 3 мин после заправки. Воздействие температуры менее минус 40 °С происходит в крайних широтах в зимние месяцы. Влияние водородного охрупчивания на материалы обычно уменьшается при более высоких температурах и увеличивается при низких температурах, потому что растет вероятность того, что водород будет адсорбироваться и связываться с материалом в местах дефектов при более низких температурах. Низкая температура не подавляет кинетику поглощения водорода в достаточной степени, чтобы предотвратить охрупчивание, а вместо этого приводит к большей чувствительности к охрупчиванию.

Условия воздействия низких температур возможно в случаях использования автомобильных транспортных средств в зимнее время (особенно ночью) в высоких широтах и при движении на высокой скорости в течение часа после заправки, когда давление остается повышенным, а температура внутри баллона достигает менее минус 40 °С.

Проводить испытания требуется при температуре 20 °С, чтобы обеспечить полноту условий испытаний для систем, которые могут иметь значительную восприимчивость к негативным воздействиям водорода в обычных условиях воздействия окружающей среды.

В.8.3.11 Ограничения по чистоте водорода

Установлены требования к неизменной чистоте испытательного газообразного водорода на протяжении всего испытания, поскольку известно, что некоторые примеси в газообразном водороде препятствуют водородному охрупчиванию. Примерами таких примесей могут служить кислород, вода, окись углерода и двуокись серы. Влияние водорода на распространение трещин ярко выражено при концентрациях примесей менее 1ppm (объемных) по кислороду и менее 10 ppm (объемных) по воде.

Другие примеси, влияющие на водородное охрупчивание (например, окись углерода и двуокись серы), редко содержатся в водороде высокой чистоты, но могут появляться в результате выделения их из материалов баллона во время испытаний, поэтому чистота выходящего газа должна быть подтверждена в конце испытаний. Требования к качеству топлива приведены в [6], но с более низким содержанием кислорода, чем верхний предел (см. [6]), по следующим причинам:

- водородное топливо, получаемое при транспортировке жидкого водорода на заправочные станции, может иметь более низкое содержание кислорода, чем верхний предел (см. [6]);
- более низкое содержание кислорода усугубляет водородное охрупчивание, поскольку адсорбция кислорода на металлических поверхностях может уменьшить поглощение водорода и, следовательно, чувствительность материала к охрупчиванию;
- испытание на охрупчивание традиционно проводят при содержании кислорода ≈ 1 ppm из остаточного воздуха после продувки газообразным водородом с концентрацией 99,9999 %, поэтому условия испытания выполнимы.

В.8.3.12 Уменьшение внутреннего объема

Возможность уменьшить внутренний объем баллона за счет использования наполнителя включена в процедуру испытаний, чтобы сократить время испытаний и снизить риск для испытательного оборудования. Для баллонов на 70 МПа с вместимостью более 1 кг по водороду время пневматического цикла (при отсутствии наполнителя) может составлять около 3 ч в условиях реальных температурных профилей, таким образом отказ системы при 11000 циклов потребует более 3000 ч (18 недель) испытаний.

Для воспроизведения условий эксплуатации баллонов минимальное время роста давления в одном цикле должно составлять 5 мин, а минимальное время выдержки при максимальном давлении — 2 мин. Скорость распространения усталостных трещин из-за водородного охрупчивания зависит от частоты циклов и от продолжительности выдержки максимального давления. Известно, что понижение частоты циклов способствует повышению скорости роста усталостных трещин при водородном воздействии, поэтому скорость повышения давления во время эксплуатационных испытаний должна быть ограничена. В принципе, скорость нарастания давления во время эксплуатационных испытаний должна быть такой же, как скорость нарастания давления во время заправки топливом, однако, в действительности, при скорости роста давления во время эксплуатационных испытаний, находящейся в пределах значений коэффициентов скорости повышения давления во время заправки топливом 2—3, ускоренный водородом рост усталостной трещины существенно не различается в сосудах для эксплуатационных испытаний и сосудах ТС. Ожидается, что максимальная скорость заправки сосудов на 70 МПа (от пустого до полного заполнения) составит 3 мин (см. ГОСТ Р 70682); возможны более медленные варианты заправки до 15 мин.

Максимальное приложенное давление обеспечивает воспроизведение наихудшего воздействия. Максимальное давление в ходе эксплуатационных испытаний соответствует максимальному давлению заправки и составляет 1,25 × НРД, обеспечивая создание соответствующих напряжений на стенках сосуда во время эксплуатационных испытаний. Продолжительность выдержки в 2 мин при максимальном давлении была выбрана на основе предыдущих протоколов испытаний, разработанных для цикличных испытаний с водородом в стальных баллонах для оценки роста усталостной трещины, ускоренной водородом.

В.8.3.13 Применимость результатов испытаний для аттестации других сосудов на совместимость с водородом. Предполагается, что производители сосудов могут выпускать такие варианты сосудов, совместимых с водородом, которые не потребуют официальных квалификационных испытаний из-за достаточного сходства с сосудами, уже испытанными в соответствии с приложением Ж. Сходство сосуда заключается в эквивалентном напряжении в стенке цилиндрической защитной оболочки сосуда (σ_H = давление х радиус/толщина) и аналогичном способе обработки его поверхности. Таким образом, диаметр сосуда, который подвергается этому испытанию, должен быть в пределах плюс 20 % от диаметра предполагаемого применения с толщиной стенок, аналогичным образом пропорциональной диаметру. Кроме того, баллон, который подвергается этому испытанию, должен иметь сравнимую конструкцию и отделку поверхности, а также иметь начальное давление разрыва в пределах плюс 20 % от предполагаемого применения.

При испытании на гидравлический разрыв одна из целей заключалась в том, чтобы скорость наддува соответствовала реальной эксплуатации. Минимальная и максимальная скорости, указанные в процедуре испытания, рассчитаны на время заполнения от 2 до 3,3 мин.

Максимальная скорость наполнения также гарантирует, что испытание на разрыв не даст искусственно завышенных результатов разрывного давления. Выбранный максимум 100%-НРД/МНН эквивалентен 1,17 МПа/с для баллонов на 70 МПа и немного меньше предельного значения 1,4 МПа/с.

Установление минимальной скорости повышения давления для последних 50 % перед разрывом было сделано, чтобы свести к минимуму разрыв под напряжением во время испытания, особенно для стеклянных волокон. Добавление этого предела гарантирует воспроизводимость результатов.

Проверка работоспособности в условиях прекращения эксплуатации предназначена для предотвращения разрыва в условиях, настолько тяжелых, что удержание водорода невозможно. Пожар является единственным условием прекращения службы, учитываемым при проектной аттестации.

Исследование случаев выхода из строя баллонов для СПГ в процессе эксплуатации за последнее десятилетие показало, что большинство пожаров произошло в системах хранения, в которых не использовались должным образом спроектированные УСД, а остальные произошли в результате того, что УСД не сработали для защиты баллона из-за отсутствия надлежащего теплового воздействия на УСД, несмотря на то, что локальный огонь смог разрушить стенку баллона и в конечном итоге привести к взрыву баллона. Метод испытания на огнестойкость в Б.12 касается как локальных пожаров, так и пожаров, охватывающих всю систему (см. [11])

Условия огневых испытаний:

- температуру 300 °С следует выбирать в качестве температуры, при которой может начаться локальное возгорание, поскольку термогравиметрический анализ показывает, что материалы баллонов начинают быстро разрушаться при этой температуре;

- состояние локализованного пожара прекращается, когда температура на обоих концах баллона достигает 300 °С из-за срабатывания УСД, расположенного на горловине. С учетом этого критерия около 40 % расследованных пожаров в лабораториях ТС привели к условиям, которые можно было бы классифицировать как локальные пожары;

- в то время как пожары в ТС в лабораториях часто продолжались от 30 до 60 минут, период распространения локального пожара на складе баллонов длился менее 530 секунд;

- средняя максимальная температура в период испытания огнем составила менее 570 °С с пиковыми температурами, достигая примерно от 600 °С до 880 °С в некоторых случаях;

- повышение пиковой температуры ближе к концу периода локализованного пожара часто сигнализировало о переходе к условию всепоглощающего огня.

Выбор 600 °С в качестве минимальной температуры для периода выдержки локализованного пожара обеспечивает соответствие средней температуры и времени воздействия локального огневого испытания данным испытаний. Термопары, расположенные на расстоянии (25 ± 10) мм от внешней поверхности испытуемого изделия, используются для контроля подвода тепла и подтверждения соблюдения требуемого температурного профиля. Для улучшения реакции и управляемости пожара во время испытаний, а также воспроизводимости результатов предусмотрено использование сжиженного нефтяного газа и ветрозащитных экранов. Опыт показывает, что управляемость горением сжиженного нефтяного газа будет составлять примерно ±100 °С на открытом воздухе, что приводит к пиковым температурам, которые также хорошо согласуются с результатами испытаний.

Предлагаемая локальная установка для испытаний на огнестойкость основана на предварительной работе, но этот подход был расширен, чтобы позволить системе хранения пройти аттестацию либо общее испытание установки или испытание установки конкретного ТС. Различия между этими двумя методами заключаются в следующем:

- общий (не относящийся к конкретному ТС) тест позволяет применять локальное испытание огнем более чем к одному ТС, но смягчающие устройства (такие как экраны) должны быть постоянно прикреплены к системе хранения и должны защищать всю систему, а не только открытую область, к локализованному пожару. Размер для типового локального испытания огнем был выбран равным (250 ± 50) мм в продольном направлении с шириной, покрывающей диаметр баллона;

- локализованное испытание на возгорание при установке конкретного ТС будет адаптировано к фактической зоне возгорания и будет включать в себя защитные функции ТС. Если изготовитель ТС решает использовать метод испытания конкретного ТС, направление и размер локального воздействия огня корректируются с учетом особенностей ТС, таких как отверстия в соседнем листовом металле для облегчения отверстий и проходы для проводов и трубопроводов или сформированные отверстия, расплавлением материалов на пути огня. Если такие отверстия или дыры малы, размер локализованного пожара уменьшается по сравнению с общим размером, чтобы создать более сложное (и реалистичное) испытание.

В.8.3.14 Испытания материалов на соответствие требованиям производства сосудов высокого давления

Требования Д.1—Д.4 обеспечивают квалификационные измерения для использования при проверке соответствия производства. Требования гарантируют, что производитель оценил соответствующие свойства пластика и смолы для долгосрочного воздействия более низких напряжений, связанных с износом материала. Долговечность наружных покрытий может оказаться избыточной при квалификационных испытаниях конструкции на химическую стойкость по 5.2.2.3.2 и 5.2.2.3.3.

Приложение Ж определяет отношения напряжений (как минимальные разрывные давления) для различных материалов, используемых при изготовлении баллонов для систем хранения сжатого водорода. Чтобы исключить предписанные проектные требования, в приложении Ж.2 представлена методология, основанная на характеристиках, для установления минимально допустимого давления разрыва BP_{min} с использованием протокола испытаний, определенного в Ж.2.3.1 или Ж.2.3.2. Хотя теоретически методология, приведенная в Ж.2, может использоваться в целом для всех типов сосудов под давлением, она ориентирована на проверку BP_{min} для композитных баллонов под давлением с внешней оболочкой.

Процесс расчета для определения требований к разрывной нагрузке в приложении Ж.2 начинается с оценки минимальной прочности, которой должны соответствовать сосуды высокого давления с защитной оболочкой из стекловолокна и композита из углеродного волокна, чтобы обеспечить 25 лет эксплуатации ТС.

Оценка сопротивления на разрыв наряду с другими параметрами долговечности является простой для серийных баллонов или промышленных прототипов, однако ситуация более сложная при определении минимального давления разрыва BP_{min}, поскольку баллоны, представляющие BP_{min}, не ожидаются во время обычных производственных испытаний. По этой причине ожидается, что потребуются некоторые корректировки во время изготовления или изменения после производства, чтобы обеспечить возможность испытаний при уровнях нагрузки, которые соответствуют более высоким уровням нагрузки, испытываемым более слабыми сосудами (с давлением разрыва BP_{min}). В Ж.2 предусмотрена коррекция давления для «точной настройки» уровней напряжения для испытаний в Ж.2.3.1 или Ж.2.3.2 при желаемом BP_{min}, но эта регулировка может быть ограничена в случае испытаний баллонов типа 3, например, когда на распределение напряжений во внутренней части баллона и композитной конструкции влияет напряжение, приближающееся к пределу текучести оболочки (или превышающее его).

На конструкцию из углеродного волокна, рассчитанную на разрыв под напряжением, в первую очередь влияет испытание под давлением 1,8 × НРД в конце эксплуатационного испытания долговечности (гидравлического) в 5.2.2.3. Поэтому испытание на долговечность (гидравлическое) в соответствии с 5.2.2.3 подходит для COPV типа 4, которые изготовлены исключительно из углеродных волокон.

Любые изменения в 5.2.2.3 для оценки прочности на разрыв должны исходить из возможности того, что композитная конструкция является такой же прочной, как из углеродного волокна, или такой же слабой, как из стекловолокна, и учитывать все промежуточные возможности. Для этого необходимо учитывать условия разрыва под напряжением как для углеродного, так и для баллона из стекловолокна как часть «эксплуатационных испытаний» в рамках протокола испытаний.

Конструктивным фактором устойчивости к разрыву баллона из углеродного волокна является максимальное давление, ожидаемое во время эксплуатации, т. е. 1,5 × НРД, которое может возникнуть при устранении экстре-

мальных неисправностей ТРК. 10 часов при 1,5 × НРД и температуре 85 °С достаточно, чтобы воспроизвести разрыв под напряжением, ожидаемый в течение всего срока службы.

Баллонам из стекловолокна требуется 105 часов при давлении 1,5 × НРД и температуре 85 °С для демонстрации стойкости к разрыву под напряжением с волокнами, потенциально такими же слабыми, как и стекловолокна.

Примечание — В качестве альтернативы возможно повышение уровня давления в баллоне до значения, необходимого для учета прочности на разрыв из стекловолокна в течение 1000-часовой выдержки, и полагаясь на 4-минутное значение, удерживание на уровне 1,8 × НРД до разрыва, но это применимо только к баллонам типа 4. Поскольку одной из целей Ж.2.3.2 является использование метода, основанного на характеристиках, которые не зависят от конструкции, предпочтительнее удерживать давления на уровне 1,5 × НРД. Кроме того, увеличение удержания давления до 1,5 × НРД сокращает период испытаний на 900 часов (более 1 месяца) без превышения максимального давления, ожидаемого во время эксплуатации.

Учитывая ситуацию, описанную для баллона из углеродного и стекловолокна, требуется два изменения в 5.2.2.3 для создания методологии, основанной на характеристиках, которую можно использовать для оценки разрыва под напряжением для углеродного и стекловолокна в сочетании с другими эффектами долговечности; уровень давления и время выдержки необходимо изменить с 1,25 × НРД на 1000 часов до 1,5 × НРД на 105 часов при 85 °С. Рисунок В.6 иллюстрирует изменения к 5.2.2.3 в Ж.2.3.2.

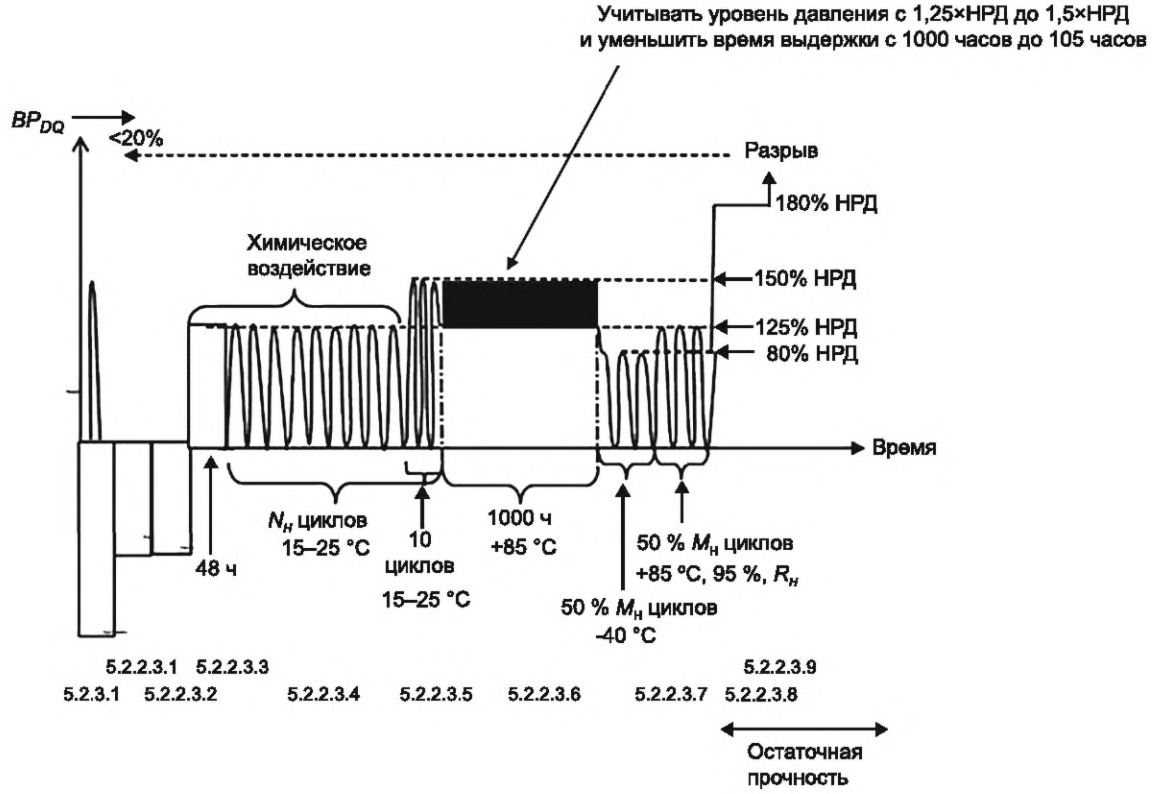


Рисунок В.6 — Модификация протокола испытаний 5.2.2.3 в пункте Ж.2.3.2

Значение BP_{min} можно определить на основе минимального давления разрыва. В случае баллонов из чистого углеродного волокна минимальное давление разрыва эталонной группы может использоваться только с поправкой на давление для учета точной настройки давления в Ж.2.3, но в случае других волокон или смесей волокон необходимо применять коэффициент 10 %, чтобы обеспечить эквивалентный предел, заложенный в методе испытаний для чистых углеродных волокон, и, таким образом, также учитывать возможное изменение заданного значения во время производства. Уравнение для BP_{min} для всех других волокон и смесей волокон в COPV:

$$BP_{min} \geq 1.1 \cdot F_{H2} \cdot BP_{G1min},$$

где F_{H2} и BP_{G1min} определены в Ж.2, а значение BP_{min} не может быть менее 2. Между BP_{min} и BP_{DQ} должен быть установлен запас для минимизации вероятности разрыва.

Протокол испытаний в Ж.2.3.2 может применяться ко всем баллонам для оценки прочности на разрыв наряду с требованиями к долговечности. Он применим для общей оценки долговечности произведенных баллонов или промышленных образцов (вместо 5.2.2.3), а также для определения минимально допустимого давления разрыва BP_{min}.

Приложение Г
(обязательное)

Руководство по проектированию компонентов для водородных систем

Компоненты могут быть квалифицированы отдельно, если они соответствуют общим требованиям 4.1, одобрены или помечены и перечислены для обслуживания в соответствии с 4.2, правильно интегрированы в систему и ТС согласно 4.4 и соответствуют применимым требованиям в разделе 5. Основное требование к отдельным компонентам заключается в том, что когда эти компоненты установлены в системе, система соответствует применимым требованиям в разделах 4 и 5 и может быть надлежащим образом интегрирована в ТС в соответствии с ГОСТ Р 70679.

Г.1 Трубопроводы, шланги, трубки и фитинги

Аттестация трубопроводов, трубок и шлангов, описанная в 4.4, должна основываться на образцах, изогнутых до минимального радиуса, с установленными соединениями, как это предполагается при фактическом использовании. Дополнительные рекомендации для конкретных ситуаций приведены в последующих разделах.

Г.1.1 Неметаллические трубы

Особое внимание следует уделить рабочим температурам, защите от механических повреждений и накоплению электростатического заряда.

Г.1.2 Шланги

Шланги, используемые для газообразного топлива, должны соответствовать применяемым требованиям. Материалы должны соответствовать требованиям, приведенным в 4.3.

Г.1.3 Соединители и фитинги

Соединители и соответствующие фитинги, используемые для транспортировки газообразного топлива, должны соответствовать минимальным требованиям. При транспортировке необходимо учитывать такие нюансы, как вибрация и срок службы, которые необходимо решить в рамках процесса отбора и аттестации.

Г.1.4 Силовой или технологический трубопровод

При транспортировке пара при манометрическом давлении более 103,4 кПа или жидкостей при манометрическом давлении более 1103 кПа и/или при температуре более 120 °С трубопроводы и связанные с ними детали необходимо изготавливать и проверять на соответствие всем применимым спецификациям. Необходимо, чтобы при транспортировке были учтены нюансы, такие как вибрация и срок службы, которые решались на этапе проектирования.

Г.2 Топливные соединения

Индивидуальные требования для каждого типа топлива приведены в разделе 5 настоящего стандарта.

Г.3 Регулирующие клапаны

Предполагаемый срок службы регулирующих клапанов должен основываться на применении ТС, определенном в разделах 4 и 5, с учетом рабочих циклов системы, частичного заполнения и методов технического обслуживания.

Клапаны управления должны проходить циклические испытания, чтобы продемонстрировать, что требования производителя ТС к надежности выполняются на заданном уровне.

Г.3.1 Автоматические запорные клапаны

В соответствии с ГОСТ Р 70679 автоматические клапаны должны быть закрыты, чтобы прерывание управляющего питания отключало подачу топлива. Питание клапанов осуществляют в соответствии с ГОСТ Р 70679. Это действие не должно влиять на безопасность других компонентов системы.

Автоматические запорные клапаны должны быть проверены на внутреннюю (через закрытый клапан) и внешнюю утечку в рамках функциональных испытаний перед испытанием на разрыв. Испытание следует проводить при 1,50 × НРД (как минимум) для систем хранения водорода и при МРД, как минимум, для систем обращения с водородом. (см. Б.2). Типичные пределы утечек для клапанов находятся в диапазоне от 10 до 30 нсм^3/ч водорода (или эквивалентной энергии для других видов топлива) в процессе любого испытания.

Г.3.2 Ручные запорные клапаны (двух- или трехходовые клапаны)

Ручные запорные клапаны следует проверить на внутреннюю (через закрытый клапан) и внешнюю утечку в рамках функциональных испытаний перед испытанием на разрыв. Испытание следует проводить при 1,50 × НРД (как минимум) для систем хранения водорода и при МРД как минимум для систем обращения с водородом (см. Б.2). Утечка не должна превышать 10 см^3/ч водорода (или эквивалентной энергии для других видов топлива) в процессе любого испытания.

При установке ручных запорных клапанов, необходимо учесть их совместимость с водородом.

Г.3.3 Регуляторы и ограничители расхода

При использовании регулятора и ограничителя расхода, они могут быть расположены в системах под давлением для ограничения выброса в случае разрыва трубопровода или серьезного отказа системы. Регуляторы расхода необходимо проверять на внутреннюю (через закрытый клапан) и внешнюю утечку в рамках функциональных испытаний перед испытанием на разрыв. Испытание следует проводить при 1,50 × НРД (как минимум) для систем хранения водорода и при МРД, как минимум, для систем обращения с водородом (см. В.2). Внешняя утечка не должна превышать 10 $см^3$/ч водорода (или эквивалентной энергии для других видов топлива) в процессе любого испытания. Внутренняя утечка должна соответствовать требованиям для правильной работы системы.

При установке регуляторов расхода необходимо учесть их совместимость с водородом.

Г.3.4 Регуляторы давления

Регуляторы давления должны быть проверены на внутреннюю (через закрытый клапан, если он используется для отсечки) и внешнюю утечку в рамках функциональных испытаний перед испытанием на разрыв. Испытание следует проводить при 1,50 × НРД (как минимум) для систем хранения водорода и при МРД, как минимум, для систем обращения с водородом (см. Б.2).

Утечка не должна превышать 10 $см^3$/ч водорода (или энергетическому эквиваленту этого количества водорода для других видов топлива) в процессе любого испытания.

При установке регуляторов давления необходимо учесть их совместимость с водородом.

Г.3.5 Обратные клапаны

Обратные клапаны должны быть проверены на внутреннюю (через закрытый клапан) и внешнюю утечку в рамках функциональных испытаний в условиях работы с водородом перед испытанием на разрыв. Испытание следует проводить при 1,50 × НРД (как минимум) для систем хранения водорода и при МРД, как минимум, для систем обращения с водородом (см. Б.2). Утечка не должна превышать 10 $см^3$/ч водорода (или эквивалентной энергии для других видов топлива) в процессе любого испытания.

Г.3.6 Клапаны управления потоком

Регулирующие клапаны должны быть проверены на внутреннюю утечку (через закрытый клапан, если он используется в качестве запорного) и на внешнюю утечку в рамках функциональных испытаний в условиях работы с водородом перед испытанием на разрыв. Испытание следует проводить при 1,50 × НРД (как минимум) для систем хранения водорода и при МРД как минимум для систем обращения с водородом (см. Б.2). Утечка не должна превышать 10 $см^3$/ч (или эквивалентной энергии для других видов топлива) в процессе любого испытания.

Г.4 Устройства сброса давления

УСД следует размещать в системах, требующих защиты от избыточного давления. УСД должно быть подключены напрямую (без клапанов или ограничений) к защищаемой системе под давлением. УСД должно быть защищено от ударов и внешних повреждений. Руководство по проектированию, строительству и размещению систем сброса приведено в 4.1.1.5, 4.1.1.6 и 4.4.3.2. Для конкретных требований к УСД для СХКВ см. раздел 5.

УСД должно быть спроектировано и изготовлено в соответствии с требованиями их эксплуатации (см. 4), особенно в течение расчетного срока службы и условий эксплуатации конкретного ТС, определенного в 4.2.

УСД должно быть проверено на внутреннюю и внешнюю утечку в рамках функциональных испытаний перед испытанием на разрыв. Испытание следует проводить при 1,50 × НРД (как минимум) для систем хранения водорода и при МРД, как минимум, для систем обращения с водородом (см. Б.2). Утечка не должна превышать 10 $см^3$/ч водорода (или эквивалентной энергии для других видов топлива) в процессе любого испытания.

Г.4.1 Термически-активируемые устройства сброса давления

ТУСД используют для защиты от разрыва под давлением, вызванного деструкцией материалов при перегреве. ТУСД должно быть расположено таким образом, чтобы обеспечить защиту оборудования, например в том же отсеке, что и оборудование, которое оно защищает. Дополнительные указания — см. приложение Е.

Г.4.2 Клапан сброса давления

КСД часто используют для смягчения колебаний давления, а затем закрывают, когда давление падает до нормального уровня. Размеры и конструкция предохранительных клапанов, приводимых в действие давлением, должны ограничивать давление менее 110 % от МДРД. Повторное закрытие должно происходить не менее чем при 90 % от установленного.

Примечание — В соответствии с 5.2.1.2 предохранительные клапаны не должны использоваться для защиты СХКВ в условиях дорожного движения.

Г.4.3 Разрывные мембраны

Разрывные мембраны представляют собой устройства без повторного включения, которые активируются давлением.

Примечание — В соответствии с 5.2.1.2 разрывные диски не должны использоваться для защиты СХКВ при дорожном движении.

Г.5 Вращающееся оборудование

Насосы и другое вращающееся оборудование должно быть спроектировано и изготовлено в соответствии с требованиями их эксплуатации, особенно в отношении расчетного срока службы и условий эксплуатации конкретного ТС, указанных в разделах 4 и 5, а также согласно электрическим требованиям ГОСТ Р 70679.

Г.6 Компоненты процесса

Теплообменники, реакторы и другие технологические компоненты необходимо проектировать и изготавливать в соответствии с требованиями их эксплуатации в соответствии с разделами 4 и 5, особенно в течение расчетного срока службы и условий эксплуатации конкретного ТС, определенного в 4.2.

Приложение Д
(обязательное)

Квалификационные испытания материалов для систем хранения компримированного водорода

Д.1 Полимерные материалы в баллонах высокого давления для хранения водорода

Д.1.1 Прочность на растяжение

Предел текучести при растяжении и предельное удлинение пластика следует определять при температуре минус 40 °С (или ниже). Результаты испытаний должны демонстрировать, что пластические свойства пластика при температуре минус 40 °С и ниже соответствуют требованиям, установленным изготовителем.

Д.1.2 Температура размягчения

Полимерные материалы из готовых лейнеров следует испытывать соответствующим методом, указанным поставщиком полимерного материала. Температура размягчения должна соответствовать требованиям производителя баллона и составлять не менее 100 °С.

Д.2 Смолы в композиционных покрытиях баллонов высокого давления для хранения водорода

Д.2.1 Прочность смолы на сдвиг определяется с использованием контрольных образцов, представляющих составную обертку. Минимальная прочность на сдвиг после 24-часового кипячения воды должна соответствовать спецификациям производителя и должна составлять не менее 13,8 МПа.

Д.2.2 Температура стеклования соответствует спецификациям производителя.

Д.3 Внешние покрытия, используемые в баллонах высокого давления для хранения водорода

Покрытия должны демонстрировать пригодность с использованием следующих или эквивалентных методов испытаний:

- испытание на адгезию для демонстрации минимальной оценки 4 при использовании метода А или В;
- испытание на гибкость с использованием метода испытаний В с оправкой 12,7 мм. при указанной толщине при минус 20 °С;
- химическая стойкость с использованием метода открытого пятна и 100-часового воздействия 30 %-го раствора серной кислоты (удельный вес 1,2) и 24-часового воздействия полиалкиленгликоля (обычная тормозная жидкость). На покрытии не должно быть признаков подъема, вздутия или размягчения. Покрытие должно иметь степень адгезии 3;
- воздействие света и воды с использованием ультрафиолетовой лампы UVA-340 в течение 1000 часов. Максимальная потеря блеска должна соответствовать требованиям изготовителя, ожидается, что она составит менее 20 %. На покрытии не должно быть признаков подъема, вздутия или размягчения. Затем покрытие должно иметь рейтинг адгезии 3 при испытании по Д.3.1;
- воздействие соляного тумана в соответствии не менее 500 часов. Подрезка не должна превышать 3 мм в месте разметки. На покрытии не допускаются признаки подъема, вздутия или размягчения. Затем покрытие должно иметь степень адгезии 3 при испытании по Д.3.1;
- испытание на ударопрочность. Покрытие при комнатной температуре должно пройти испытание на удар силой 18 Дж;
- стойкость к сколам. Покрытие соответствует спецификациям производителя, оно должно быть 7А или выше. На покрытии не допускаются признаки подъема, вздутия или размягчения. Затем покрытие должно иметь рейтинг адгезии 3 при испытании по Д.3.1.

Д.4 Металлы для защиты баллонов хранения компримированного водорода

Руководство по выбору материалов для водородной среды приведено в приложении А.

Демонстрируемая прочность на растяжение и относительное удлинение металлических баллонов или их лейнеров должны соответствовать проектным спецификациям изготовителя.

Примечание — Для защитной оболочки без полной композитной волокнисто-смоляной структурной оболочки рекомендуется, чтобы удлинение лейнеров составляло не менее 14 % для стальных сплавов и 12 % — для алюминиевых сплавов.

Приложение Е
(обязательное)

Руководство по интеграции системы подачи сжатого водорода

Е.1 Устройства для сброса давления

УСД — это устройства, которые при активации в определенных рабочих условиях используются для сброса сжатого водородного топлива. Конструкция и компоновка вентиляционной системы УСД для достижения надлежащей пропускной способности также имеют решающее значение для защиты системы хранения водорода.

Баллоны с водородом могут подвергаться воздействию внутренних технических сбоев или повышенной внешней температуры из-за пожара. В таких условиях возникает большая вероятность увеличения внутреннего давления баллонов и/или последующее разрушение конструкционных материалов, степень которого зависит от типа баллона и самих материалов. УСД предназначено для сброса давления баллонов в этих условиях. ТУСД активируется при повышенной температуре, а активируемое давлением предохранительное устройство активируется высоким давлением. Комбинированное предохранительное устройство активируется давлением или температурой, действующими независимо или вместе.

Использование определенного УСД может не подходить для всех типов, размеров и/или вариантов установок баллонов.

Е.1.1 Расчетный срок службы УСД

Расчетный срок службы УСД должен соответствовать или превышать расчетный срок службы баллона, для которого он используется.

Примечание — Это утверждение является требованием уровня подсистемы и важно для общей производительности системы, поскольку проектный срок службы баллона является решающим фактором для срока службы системы хранения топлива и того, когда ее следует вывести из эксплуатации.

Е.1.2 Расчетное рабочее давление

Расчетное рабочее давление УСД, запорных устройств, обратных клапанов и другого оборудования в СХКВ должно соответствовать или превышать расчетное рабочее давление баллона, для которого оно используется.

Примечание — Это утверждение является требованием уровня подсистемы и важно для общей производительности системы.

Непреднамеренная активация УСД может произойти, если расчетное рабочее давление баллона выше, чем расчетное рабочее давление УСД.

Е.2 Размещение внутри транспортного средства

Е.2.1 Расположение термически-активируемого устройства сброса давления

Термочувствительную часть ТУСД необходимо располагать в той же области или отсеке и подвергать воздействию той же окружающей среды, что и баллон или защищаемые системы. ТУСД не следует соединять последовательно с другими ТУСД или другими типами УСД, если специально не подтверждено, что ТУСД может правильно работать при последовательном соединении. Экраны и барьеры потока, если таковые имеются, не должны мешать отклику или функционированию ТУСД (см. Е.2.2).

Примечание — Это утверждение является требованием уровня ТС и важно для общей производительности системы. Если термочувствительная часть УСД и баллоны расположены в разных местах, это может вызвать проблемы с безопасностью, так как УСД может не сработать во время пожара.

Е.2.2 Экраны и барьеры потока (включая вентиляционные коробки и газонепроницаемые кожухи)

Экраны могут использовать для защиты СХКВ от физических, химических и тепловых воздействий. Солнечные экраны следует рассматривать для защиты от теплового и УФ-воздействия из-за прямого воздействия солнечных лучей.

Тепловые экраны также могут использоваться (при необходимости) в водородных системах, чтобы свести к минимуму локальное тепловое воздействие из-за пожара в соседних отсеках/областях ТС (например, в пассажирском салоне или нишах колес) до тех пор, пока УСД не смогут активироваться для смягчения потенциально опасных событий. Расположение и конструкция швов, отверстий для обслуживания и люков в ТС, щитов или барьеров для потока должны быть такими, чтобы не угрожать эффективности УСД.

Экраны также могут использоваться в качестве барьеров потока для улавливания потенциальных утечек из различных соединений с предохранителями, клапанами и горловинами баллонов и направления газа из отсека для предотвращения образования горючей газовой смеси в замкнутом пространстве. Вентиляционные коробки и газонепроницаемые корпуса являются общепринятыми промышленными вариантами для таких реализаций барьеров потока.

Описание барьеров потока — по ГОСТ Р 70679. В случае, если барьеры потока являются функциональной частью вентиляционной системы сброса УСД, барьеры должны соответствовать Е.3.

Конструкция и расположение экранов и барьеров потока (включая вентиляционные коробки и газонепроницаемые кожухи) не должны мешать способности УСД (особенно ТУСД) защищать водородные системы.

Примечание — Необходима защита функциональности УСД и предотвращения образования горючих газовых смесей.

Е.3 Системы выпускной вентиляции УСД

Основная функция выпускной вентиляционной системы УСД, если она используется, состоит в том, чтобы направить выброс из УСД таким образом, чтобы свести к минимуму опасность, представляемую пассажирам и людям, окружающим ТС, и распространение опасностей на окружающую среду ТС.

Е.3.1 Конструкционные материалы для выпускных вентиляционных систем УСД

Выпускные вентиляционные системы УСД, включая соединительные линии, воздуховоды, вентиляционные трубы, выпускные отверстия и ограничивающие системы (если они используются), должны быть защищены по конструкции, маршруту и материалам конструкции от механических или тепловых воздействий, сбоя или деградации и поддерживать целостность системы до тех пор, пока вентиляция не будет завершена. Необходимо, чтобы материал конструкции снижал риск коррозии и не вызывал гальваническую коррозию в месте соединения с УСД.

Накопление электростатического заряда и возможность воспламенения во время разряда также должны быть уменьшены (см. ГОСТ Р 70679).

Конструкция, прокладка и материалы изготовления вентиляционных линий, воздуховодов и выпускных отверстий УСД могут вызвать проблемы с безопасностью, если они преждевременно выходят из строя или ухудшаются во время эксплуатации или во время пожара. Кроме того, коррозия может уменьшить способность УСД выпускать воздух при проектной скорости потока или может привести к отделению вентиляционной трубки от УСД.

Е.3.2 Прокладка выпускной вентиляционной системы УСД

Прокладка соединительных линий, воздуховодов, вентиляционных трубок и выпускных отверстий УСД должна избегать сужений или защемлений, а также должна быть защищена в случае столкновения ТС, чтобы функциональность не нарушалась из-за ограничений потока. Вентиляционная линия не должна снижать предполагаемую пропускную способность ТУСД за счет создания дроссельных отверстий или других ограничений.

Примечание — Примеры проектных требований могут включать спецификацию размера, ограничения и прокладки вентиляционного трубопровода, для предотвращения ограничения оседания высвобождаемого материала.

Вентиляционные линии следует надлежащим образом закреплять, чтобы предотвратить их повреждение в течение всего срока службы ТС или неконтролируемое движение во время вентиляции.

Если линии, воздуховоды или выпускные отверстия УСД были пережаты или повреждены во время столкновения ТС, это может создать угрозу безопасности при сбросе давления устройством. Вентиляционные каналы должны быть надлежащим образом закреплены, чтобы предотвратить их повреждение в течение всего срока службы ТС или неконтролируемое движение во время вентиляции.

Е.3.3 Выбросы из вентиляционной системы сброса УСД

Выпуск устройства для сброса давления не должен направлять выхлопные газы из УСД, защищающих СХКВ, в пассажирские, багажные или грузовые отсеки, или по направлению к ним, в корпуса колес или по направлению к СХКВ, в переднюю часть ТС или горизонтально (параллельно дороге). Следует минимизировать риск для пассажиров и лиц, находящихся вне ТС, а также снизить риск распространения опасностей внутри ТС или его окружения. Конструкция и установка должны сводить к минимуму возможность внешних опасностей, возникающих в результате срабатывания устройства.

Необходимо, чтобы выпускная вентиляционная система выпускала скопившееся количество газа или видела его количество из УСД, сохраняя при этом функциональность.

Е.3.4 Попадание воды в линии выпускной вентиляционной системы УСД

Возможно скапливание влаги на вентиляционной стороне УСД из-за конденсации и/или попадания воды во время неблагоприятных условий или мойки ТС. Поскольку УСД и связанные с ними соединения и трубки могут быть повреждены в результате воздействия воды или льда, вентиляционные системы УСД следует проектировать таким образом, чтобы предотвратить попадание посторонних материалов или накопление влаги в системе. УСД или связанные с ним соединения и трубки не должны скапливать жидкость.

Вентиляционные системы УСД и затворы вентиляционных линий (например, колпачки) не должны ограничивать поток из УСД таким образом, чтобы это могло повлиять на его работу.

Накопление инородного материала потенциально может снизить скорость потока во время сброса, что создает угрозу безопасности.

Кроме того, влага в вентиляционной линии потенциально может замерзнуть в холодных условиях эксплуатации и либо ограничить скорость потока во время сброса, либо повредить узел УСД. Чтобы избежать этого, крышки

вентиляционной линии, если они используются, следует проектировать и изготавливать таким образом, чтобы поддерживать функциональную целостность.

Е.3.5 Пропускная способность УСД

Достаточность пропускной способности УСД и его вентиляционных линий должна быть продемонстрирована расширенным испытанием на огнестойкость по 5.2.2.4.2. Линии подачи и нагнетания, если они используются, не должны снижать расчетную пропускную способность УСД из-за наличия в них непреднамеренных точек дросселирования или других ограничений потока. Если конфигурация системы хранения позволяет пропускать через одно УСД потоки из более чем одного баллона, то это УСД должно обладать соответствующей пропускной способностью. (см. ГОСТ Р 70679). Недостаточная пропускная способность УСД может привести к проблемам с безопасностью.

Е.4 Предупреждающая маркировка

УСД и другие компоненты, которые монтируются вне сборок баллонов для хранения водорода (но подсоединяются к баллонам выше по потоку от запорной арматуры и, следовательно, находятся под давлением хранения), должны иметь желтую предупредительную этикетку с черными буквами с указанием того, что компонент содержит водород, хранящийся под высоким давлением, даже когда запорный и сервисный клапаны закрыты.

Примечание — Желтая предупредительная этикетка должна быть прикреплена к внешним УСД в качестве предупреждения для специалистов по обслуживанию о том, что снятие УСД перед вентилированием баллона может вызвать проблемы с безопасностью и быстрое истечение газа из системы хранения.

Е.5 Условия эксплуатации

Е.5.1 Осмотр

УСД следует осматривать одновременно с баллоном, для которого оно установлено, в соответствии с инструкцией производителя УСД, баллона или ТС по осмотру на наличие повреждений или износа. Внешнюю поверхность УСД можно очищать неагрессивными чистящими средствами. Вентиляционные линии УСД и вентиляционные колпачки, если они используются, следует проверять одновременно в соответствии с инструкциями производителя.

Примечание — Это утверждение является требованием уровня ТС и важно для общей производительности системы. Регулярная проверка УСД на наличие повреждений или ухудшения состояния, увеличивает вероятность вывода поврежденных или изношенных устройств из эксплуатации.

Е.5.2 Восстановление и ремонт

Бывшее в эксплуатации УСД не подлежит ремонту или восстановлению без письменного разрешения производителя УСД, баллона, СХКВ или ТС.

УСД следует считать вышедшим из строя, если оно становится неспособно удерживать давление. Примерами являются разрушения, препятствующие повторной установке устройства, или появление отверстия диаметром не менее 5 мм в корпусе устройства. Вышедшее из строя УСД не подлежит ремонту и повторной установке.

Примечание — Это утверждение является требованием уровня ТС и важно для общей работоспособности системы. УСД по своей конструкции предназначены для одноразовой установки. Несанкционированная переделка или ремонт потенциально могут повлиять на квалификацию УСД, что может привести к нарушению условий безопасности.

Е.5.3 Замена

УСД, требующее замены в течение срока службы, следует заменять только идентичным устройством или подходящей заменой, разрешенной производителем баллона, СХКВ или производителем ТС.

Примечание — Если УСД было заменено устройством, которое не было одобрено производителем для использования, оно может не обеспечить надлежащей безопасности СХКВ.

Е.5.4 Повторное использование и переустановка

Никакое УСД, бывшее в эксплуатации, не должно переустанавливаться или повторно использоваться в другой СХКВ. УСД следует переустанавливать на тот же баллон только в том случае, если это делается в соответствии с процедурами обслуживания, рекомендованными производителями УСД.

Примечание — Это утверждение важно для общей работоспособности системы. УСД по своей конструкции предназначены для одноразовой установки. Кроме того, переустановка в последующую сборку баллонов потенциально может привести к проблемам с безопасностью, поскольку система может не пройти аттестацию конструкции. Уплотнительные компоненты и фитинги могут потребовать замены перед повторной установкой и только в том случае, если это рекомендовано производителем УСД. Некоторые УСД не предназначены для установки более одного раза.

Приложение Ж
(обязательное)

Руководство по определению сопротивления на разрыв сосудов высокого давления

Ж.1 Определение сопротивления на разрыв баллонов для хранения компримированного водорода под высоким давлением

Целью этого раздела является оценка конструкционных материалов баллонов СХКВ на основе сопротивления на разрыв. Поскольку допустимость применения тех или иных материалов основана на их способности выдерживать нагрузки, возникающие при длительном воздействии повышенного давления, минимально допустимое давление разрыва BP_{min} должно определяться в процессе аттестации сосудов высокого давления.

Примечание — BP_{min}, определяемое здесь, основано на расчетных требованиях, предъявляемых к сосудам высокого давления с водородом, однако федеральные или региональные нормы могут требовать более высоких значений на основе истории различных прецедентов и других соображений, поэтому перед окончательным выбором BP_{min} необходимо проанализировать действующие нормативы.

BP_{min} должно быть больше или равно 2,0 × НРД как абсолютное минимальное значение, независимо от выбора материала. Соответствие этому требованию может быть продемонстрировано соблюдением любого из перечисленных далее условий.

Ж.1.1 Баллоны, в конструкции которых присутствуют композиты, армированные углеродным волокном и/или металлическими сплавами, должны быть аттестованы (5.2.2.1) с использованием минимального значения BP_{min}, составляющего 2,0 × НРД. При проведении этого испытания не следует учитывать отдельные случаи разрыва волокон композита при не нарушенной герметичности баллона.

Ж.1.2 Баллоны с армированной волокном композитной оболочкой, состоящей из более чем 95 % по массе волокон из углеродного волокна (за исключением горловины и лейнера), должны быть аттестованы (см. 5.2.2.1) с использованием минимального значения BP_{min}, равного 2,0 × НРД. При проведении этого испытания не следует учитывать отдельные случаи разрыва волокон композита при не нарушенной герметичности баллона.

Ж.1.3 Баллоны, в конструкции которых присутствуют композиты, армированные стекловолокном, должны быть аттестованы с использованием минимального значения BP_{min}, равного 3,5 × НРД.

Ж.1.4 Баллоны, демонстрирующие достаточную устойчивость к разрыву при эксплуатации в экстремальных условиях в течение не менее 25 лет (см. Ж.2 для руководства по проведению ускоренного испытания и приложение В для обоснования разработки метода и критериев испытания).

Ж.1.5 Баллоны, конструкция которых сопоставима с таковой у баллонов, ранее аттестованных в соответствии с процедурой испытаний, приведенной в Ж.2. При этом BP_{min} баллона должно быть равно или больше BP_{min} ранее аттестованного баллона.

Ж.2 Руководство по проведению испытаний сопротивления на разрыв баллонов высокого давления

Цель этого раздела состоит в том, чтобы определить BP_{min} и связанные с ним целевые показатели BP_{DQ} и 90 % BP_{DQ} в соответствии с 5.2.2.1.2.

Теоретически, методика может быть применена к баллонам любого типа, однако она особенно полезна для баллонов типов 3 и 4, в которых композитная конструкция в значительной степени обеспечивает сдерживание давления.

Процесс начинается с изготовления баллона, который намеренно делают менее прочным, чем при обычном производстве, чтобы смоделировать наихудшие из допустимых условий производства (см. Ж.2.1).

Затем часть баллонов подвергают испытанию сопротивления на разрыв в соответствии с Ж.2.2 для определения базового соответствия требованию к сопротивлению на разрыв.

Процесс определения минимально допустимого давления разрыва фокусируется только на способности баллона выдерживать давление, однако методики, описанные в Ж.2.3, учитывают вместе с этим также и прочие факторы (например, физическое или химическое повреждение, циклическая усталость), добавляя минимальные эксплуатационные требования к прочности на разрыв в протоколе испытаний на долговечность (см. 5.2.2.3).

Ж.2.1 Подготовка к испытаниям сопротивления на разрыв

Чтобы убедиться, что испытательные образцы соответствуют предъявляемым требованиям, квалификационная партия, представленная для испытаний, должна быть специально изготовлена и/или изменена таким образом, чтобы BP_{min} баллонов в партии более репрезентативно отражало характеристику наихудшего случая, чем при нормальном производстве. Это может быть достигнуто, например, путем использования при производстве партии более слабых волокон или путем изменения прочности композитной структуры при или после изготовления. В конечном счете, цель состоит в том, чтобы воспроизвести такое напряжение в нагружаемых давлением материалах баллона, которое возникло бы только в случае критических состояний.

Для испытаний должно быть представлено не менее двадцати баллонов из специальной партии для испытаний, представляющих материалы и конструкцию баллона в соответствии с 5.2.2.

Представленные баллоны должны быть случайным образом разделены на две равные группы для дальнейших испытаний (не менее 10).

Ж.2.2 Основное испытание на разрыв

Баллоны первой группы (не менее 10) следует испытывать по методике В.3.

Чтобы убедиться, что баллоны соответствуют требованию к целевому показателю BP_{min}, разница в давлениях разрыва всех испытанных в первой группе баллонов не должна превышать 10 % друг от друга.

Ж.2.3 Испытание сопротивления на разрыв

Вторая группа баллонов (не менее 10) должна быть испытана по протоколу, определенному в Ж.2.3.1 или Ж.2.3.2, с использованием N_H и M_H, как определено в 5.2.2.

Баллоны из чистого углеродного волокна могут быть испытаны в соответствии с Ж.2.3.1 или Ж.2.3.2, тогда как баллоны со стекловолокном, смесями волокон или другими альтернативными волокнами должны быть испытаны в соответствии с Ж.2.3.2 для определения BP_{min}.

После определения BP_{min} целевые значения для производства BP_{DQ} и 90 % BP_{DQ} должны быть установлены с использованием методики статистического производственного контроля, чтобы вероятность выхода из строя произведенного баллона была маловероятной (например, менее одного выхода из строя на миллион часов), при эксплуатации ТС в наихудших условиях, определенных в 5.2.

Ж.2.3.1 Испытания на прочность на разрыв для баллонов из чистого углеродного волокна типа 4

Для того, чтобы минимум испытательной группы заведомо представлял самый слабый из производимых баллонов, параметры испытаний могут быть скорректированы с помощью коэффициента $F_{H.2}$, описанного ниже, чтобы привести уровень напряжения при испытании к самому высокому уровню давления, отражающему целевое значение BP_{min} для производства.

$$F_{H.2} = BP_{min\text{-цель}} / BP_{G1min}, \quad (Ж.1)$$

$$BP_{DQ\text{-}TEST} = BP_{min\text{-цель}} / 0{,}9, \quad (Ж.2)$$

$$НРД_{TEST} = F_{H.2} \cdot НРД_{G1}. \quad (Ж.3)$$

Протокол испытаний на долговечность в 5.2.2.3 может использоваться без изменений для оценки баллона из чистого углеродного волокна с использованием $BP_{DQ} = BP_{DQ\text{-}TEST}$ и НРД = $НРД_{TEST}$, определяемых по формулам выше.

Если все баллоны во второй испытательной группе проходят испытание, как определено выше, то BP_{min} можно определить следующим образом для баллона из чистого углеродного волокна: $BP_{min} \geq BP_{min\text{-цель}}$, но не менее 2,0.

Ж.2.3.2 Испытания на сопротивление разрыву для всех типов баллонов

Для того, чтобы минимум испытательной группы заведомо представлял самый слабый из производимых баллонов, параметры испытаний могут быть скорректированы с помощью коэффициента $F_{H.2}$, описанного ниже, чтобы привести уровень напряжения при испытании к самому высокому уровню давления, отражающему целевое значение BP_{min} для производства.

Примечание — Возможность использования $F_{H.2}$ для установки уровня напряжения может быть ограничена типом конструкции баллона. Например, лейнер баллона типа 3 может деформироваться во время испытания на разрыв, если значение $F_{H.2}$ слишком велико, или может подвергаться усталостным изменениям при циклическом изменении давления. В этом случае баллоны, изготовленные для испытания в Ж.2, могут нуждаться в более точном соответствии с целевым значением BP_{min}.

Баллоны со стеклянными или углеродными волокнами, смесями стеклянных волокон или другими альтернативными волокнами должны быть испытаны в соответствии с Ж.3.1 (с использованием $BP_{DQ} = BP_{DQ\text{-}TEST}$ и НРД = = $НРД_{TEST}$, как определено ниже), чтобы определить минимальный коэффициент разрыва, который может соответствовать прочности на разрыв. В соответствии с приложением В минимальное значение должно быть не более 90 % от BP_{min}, испытания следует проводить при следующих условиях:

$$F_{H.2} = (0{,}9 \cdot BP_{min\ цель}) / BP_{G1min}, \quad (Ж.4)$$

$$BP_{DQ\text{-}TEST} = (0{,}9 \cdot BP_{min\ цель}) / 0{,}9 = BP_{min\ цель}, \quad (Ж.5)$$

$$НРД_{TEST} = F_{H.2} \cdot НРД_{G1}. \quad (Ж.6)$$

Кроме того, поскольку испытуемые баллоны не обязательно имеют минимальное давление разрыва 2,0 × НРД, 4-минутное испытание на предельную прочность при 1,8 х НРД должно быть изменено на 80 % от $BP_{DQ\text{-}TEST}$, если $BP_{DQ\text{-}TEST}$ меньше 2,20 × НРД при проведении испытаний в этом разделе.

Если все баллоны во второй испытательной группе проходят испытание, как определено выше, тогда BP_{min} можно определить следующим образом для всех других баллонов:

$$BP_{min} \geq BP_{min\ цель}, \text{ но не менее 2,0.}$$

Ж.3 Определение и подтверждение производственных целей

Целевые показатели при производстве баллонов BP_{DQ} и 90% BP_{DQ} должны проходить подтверждение в случае, если определение давления разрыва происходит согласно Ж.2.

Учитывая возможную изменчивость производства, следует испытывать больше баллонов, чем обычно требуется в 5.2.2. Необходимо изготовить не менее 20 баллонов и разделить их на две равные группы. Первая группа испытывается на разрыв, чтобы продемонстрировать соответствие 5.2.2.1.2.б, вторая испытывается в соответствии с Ж.2.3.1, в случае баллонов типа 4 — с чистым углеродным волокном, или Ж.2.3.2 — при прочих случаях, чтобы продемонстрировать соответствие 5.2.2.3 с адекватной устойчивостью к разрыву под напряжением.

Примечание — Приложение Ж.2.3.2 может заменить 5.2.2.3, поскольку условия испытаний более жесткие.

Ж.3.1 Модифицированный протокол испытаний для проверки разрыва под давлением

Протокол испытаний в 5.2.2.3 имитирует экстремальные условия и длительное использование баллона для хранения сжатого водорода. Чтобы также в целом оценить сопротивление разрыву при нагрузке наряду с другими факторами нагрузки, необходимо изменить протокол испытаний, как описано в приложении В и показано на рисунке Ж1.

Уровень давления для выдержки в 5.2.2.3.6 увеличен с 1,25 × НРД до 1,50 × НРД, чтобы воспроизвести требование минимального напряжения для баллона из углеродного волокна, а также отрегулировать время выдержки, чтобы удовлетворить требование прочности на разрыв для баллона из стекловолокна. Модифицированная фиксация также позволяет оценить стабильность композитной структуры независимо от волокнистого материала. Поскольку метод испытания основан на охвате диапазона баллона от стекловолокна до углеродного волокна, ожидается, что метод испытания будет приемлемым для широкого спектра волокнистых материалов и смесей волокон, а также для количественной оценки влияния различных смол на прочность и стабильность композита. Поскольку сопротивление разрыву под давлением проводится в расчетных диапазонах давления и температуры, испытание будет применимо ко всем типам (см. приложение В).

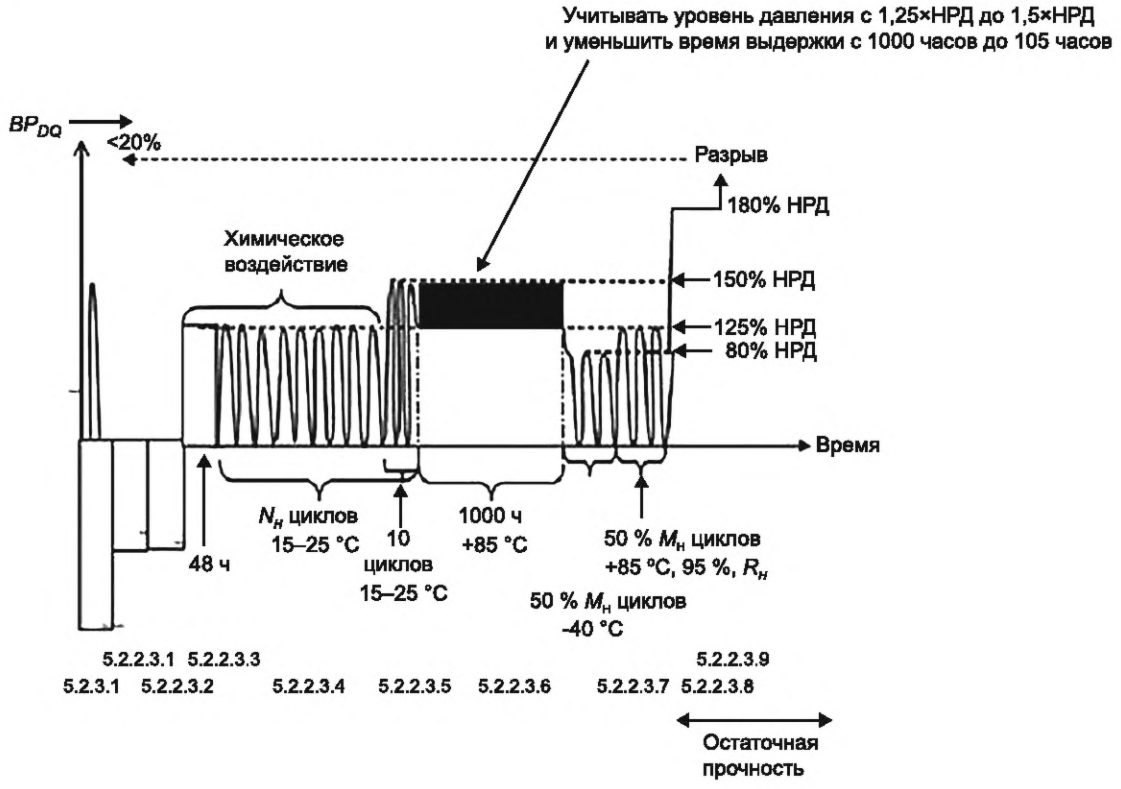


Рисунок Ж.1 — Изменения в программе испытаний 5.2.2.3

Библиография

[1] SAE J2600—2015 Устройства для заправки транспортных средств сжатым водородом (Compressed Hydrogen Surface Vehicle Fueling Connection Devices)

[2] SAE J2799—2014 Аппаратное и программное обеспечение для связи между водородным наземным транспортным средством и станцией (Hydrogen Surface Vehicle to Station Communications Hardware and Software)

[3] ИСО 9809-1 Баллоны газовые. Проектирование, конструирование и испытания бесшовных стальных газовых баллонов и труб многоразового использования (Gas cylinders — Design, construction and testing of refillable seamless steel gas cylinders and tubes)

[4] ИСО 7866 Баллоны газовые. Газовые бесшовные многоразовые баллоны из алюминиевого сплава. Расчет, конструкция и испытание. (Gas cylinders — Refillable seamless aluminium alloy gas cylinders — Design, construction and testing)

[5] ЕН 1964-3 (Баллоны газовые переносные. Технические требования к проектированию и конструированию переносных бесшовных стальных газовых баллонов многократного использования вместимостью от 0,5 л до 150 литров включительно. Часть 3. Баллоны бесшовные из нержавеющей стали с Rm менее 1100 МПа) Transportable gas cylinders — Specification for the design and construction of refillable transportable seamless steel gas cylinders of water capacities from 0,5 litre up to and including 150 litres. Part 3: Cylinders made of seamless stainless steel with an Rm value of less than 1100 MPa)

[6] SAE J2719—2020 Качество водородного топлива для транспортных средств на топливных элементах (Hydrogen Fuel Quality for Fuel Cell Vehicles)

[7] B.C. Odegard, J.A. Brooks and A.J. West. The Effect of Hydrogen on the Mechanical Properties of Nitrogen Strengthened Stainless Steels. In: A.W.Thompson and I.W. Bernstein (eds). Effect of Hydrogen on Behavior of Materials. New York, TMS, 1976, 116-125; and R.E. Stoltz and J.B. Vander Sande. The effect of nitrogen on stacking fault energy of *Fe-Ni-Cr-Mn* steels. Metall Trans 11A (1980) 1033—1037). (Б.К. Одегард, Дж. А. Брукс и А. Дж. Уэст. Влияние водорода на механические свойства нержавеющих сталей, упрочненных азотом. В книге А.В.Томпсона и И.В. Бернштейна (ред.). Влияние водорода на поведение материалов. Нью-Йорк, TMS, 1976, 116—125; и Р.Э. Штольц и Дж.Б. Вандер Санде. Влияние азота на энергию разрушения штабелирования сталей Fe-Ni-Cr-Mn. Metall Trans 11A (1980) 1033-1037)

[8] H.F. Jackson, K.A. Nibur, C. San Marchi, J.D. Puskar and B.P. Somerday. Hydrogen assisted crack propagation in 304L/308L and 21Cr-6Ni-9Mn/308L austenitic stainless-steel fusion welds. Corr. Sci. 60 (2012) 136-144; and J.R. Buckley and D. Hardie. The effect of pre-straining and d-ferrite on the embrittlement of 304 L stainless steel by hydrogen. Corr. Sci. 34 (1993) 93-107 (Х.Ф. Джексон, К.А. Нибур, К. Сан Марчи, Дж. Д. Пушкар и Б.П. Сомердей. Распространение трещин при помощи водорода в сварных швах из нержавеющей стали 304L/308L и 21Cr-6Ni-9Mn/308L Корр. Sci. 60 (2012) 136-144; и Дж. Р. Бакли и Д. Харди. Влияние предварительной деформации и d-феррита на охрупчивание нержавеющей стали 304 L водородом. Корр. Sci. 34 (1993) 93-107)

[9] J.R. Scully, G.A. Young Jr., and S.W. Smith. Hydrogen Embrittlement of Aluminum and Aluminum-Based Alloys. In: Gaseous Hydrogen Embrittlement of Materials in Energy Technologies, Vol. 1, R.P. Gangloff and B.P. Somerday, Eds., Woodhead Publishing Ltd., Cambridge UK, pp. 707-768 (Дж.Р. Скалли, Г.А. Янг-младший и С.В. Смит. Водородное охрупчивание алюминия и сплавов на основе алюминия. В: Газообразное водородное охрупчивание материалов в энергетических технологиях Том 1, Р.П. Ганглофф и Б.П. Сомердей, ред., Woodhead Publishing Ltd., Кембридж Великобритания, стр. 707-768)

[10] J.R. Scully, G.A. Young Jr., and S.W. Smith. Hydrogen Embrittlement of Aluminum and Aluminum-Based Alloys. in Gaseous Hydrogen Embrittlement of Materials in Energy Technologies, Vol. 1, R.P. Gangloff and B.P. Somerday, Eds. Woodhead Publishing Ltd., Cambridge UK, pp. 707-768 (Дж. Р. Скалли, Г.А. Янг-младший и С.В. Смит. Водородное охрупчивание алюминия и сплавов на основе алюминия. В: Газообразное водородное охрупчивание материалов в энергетических технологиях. Том 1, Р.П. Ганглофф и Б.П. Сомердей, ред., Wood head Publishing Ltd., Кембридж Великобритания, стр. 707-768)

[11] Scheffler G. W. et al. Establishing localized fire test methods and progressing safety standards for FCVs and hydrogen vehicles. — SAE Technical Paper, 2011. — №. 2011-01-*0251* (Шеффлер Г.В. Разработка локальных методов испытаний на огнестойкость и повышение стандартов безопасности для FCV и транспортных средств, работающих на водороде — Технический журнал SAE, 2011. — №2011-01-0251)

УДК 629.006.354 ОКС 43.020

Ключевые слова: Автомобильные транспортные средства, топливные элементы, водородная топливная система, системы обращения, хранение водорода, требования безопасности

Редактор *Е.Ю. Митрофанова*
Технический редактор *И.Е. Черепкова*
Корректор *О.В. Лазарева*
Компьютерная верстка *Е.А. Кондрашовой*

Сдано в набор 02.10.2023. Подписано в печать 16.10.2023. Формат 60×84⅛. Гарнитура Ариал.
Усл. печ. л. 9,30. Уч.-изд. л. 7,96.

Подготовлено на основе электронной версии, предоставленной разработчиком стандарта

Создано в единичном исполнении в ФГБУ «Институт стандартизации»
для комплектования Федерального информационного фонда стандартов,
117418 Москва, Нахимовский пр-т, д. 31, к. 2.

gost.e-ecolog.ru gost.e-ecolog.ru