

*В.И. Кривцова, д-р техн. наук, профессор, УГЗУ,
Ю.П. Ключка, к.т.н., ст. научн. сотр., УГЗУ*

ОСОБЕННОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВОДОРОДА НА АВТОМОБИЛЬНОМ ТРАНСПОРТЕ

Определены пожаровзрывоопасные фазы в процессе эксплуатации автомобильного транспорта, использующего водород. В зависимости от типа силовой установки определены расходные характеристики автомобильного транспорта по водороду. Показаны причины и возможные последствия аварийных ситуаций на различных этапах функционирования автомобиля, использующего водород.

Ключевые слова. Водород, автомобиль, система хранения водорода, расход топлива, пожаровзрывоопасность.

Постановка проблемы. Современное состояние мировой энергетики, основанной на углеводородных источниках сырья, характеризуется как предкризисное [1, 2]. На рис. 1 показан прогноз изменения доли основных видов энергосырья в обеспечении мирового энергопотребления [1].

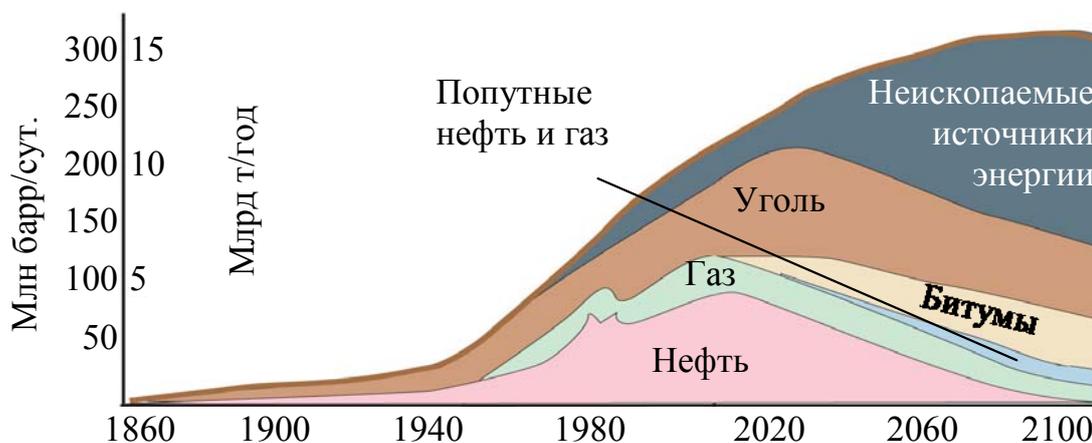


Рис. 1 – Прогноз изменения доли основных видов энергосырья в обеспечении мирового энергопотребления [1]

Анализ показывает, несмотря на то, что добыча нефти и газа сократится, и к концу столетия составит менее 10% от общего энергопотребления, потребление энергосырья в мире будет расти. Предполагается, что получаемая энергия частично будет расходована на получение водорода [1], доля которого в конечном потребителе до конца столетия составит около 50% (рис. 2).

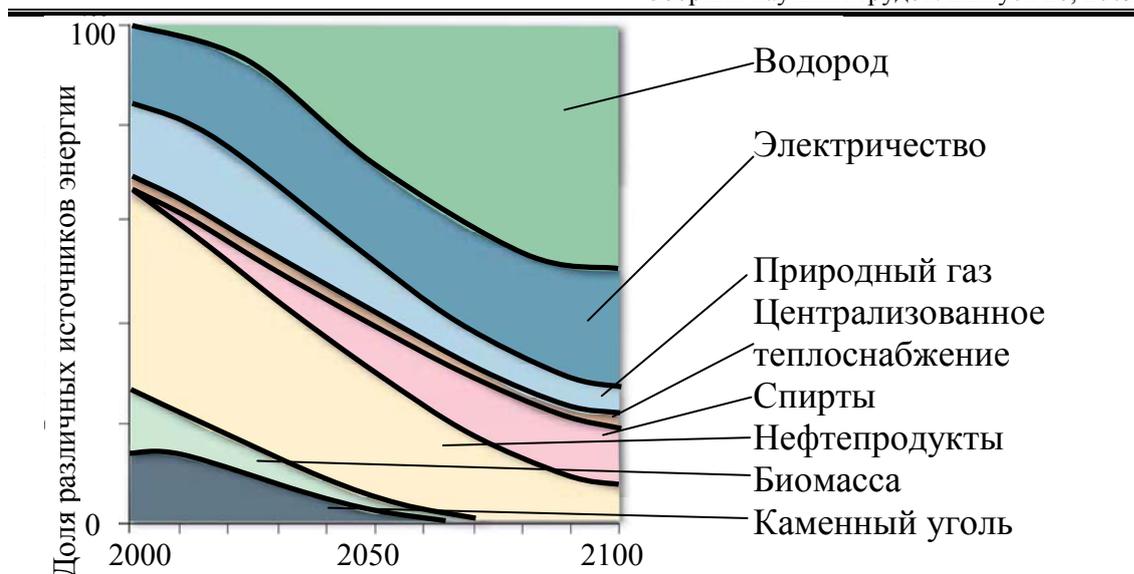


Рис. 2 – Доля использования источников энергии в конечном потребителе [1]

Из рис. 2 следует, что доля электричества в конечном потребителе останется практически на том же уровне. При этом доля природного газа, нефтепродуктов, биомассы и угля снизится. Уменьшение этих источников энергии позволит водороду занять ключевую позицию.

В настоящее время водород рассматривается как один из перспективных экологически чистых энергоносителей для транспорта будущего. Необходимым условием для этой реализации, особенно на автомобильном транспорте, является создание малогабаритных аккумуляторов водорода с высокой емкостью, обеспечивающих при массе и габаритных размерах, сравнимых с современным автомобильным бензобаком, пробег транспортного средства в несколько сот километров. Одной из проблем создания данных систем является их пожаровзрывоопасность.

Анализ последних достижений и публикаций. Анализ Международной автоматизированной базы данных "Materials Science Citation Index" показал постоянно растущий интерес к проблеме хранения водорода в целом и к разработке сплавов-накопителей водорода [6].

Из анализа следует, что с каждым годом увеличивается количество публикаций, посвященных хранению водорода. Часть этих работ тем или иным образом посвящена безопасности эксплуатации систем, использующих водород.

На автомобильном транспорте применяться водород может как в чистом виде, так и в смеси с углеводородным топливом. Благодаря его высокой физико-химической активности, небольшая (5-10% масс.) добавка водорода к бензину позволяет снизить токсичность выхлопных газов на 65-75% [8].

Таблица 1 – Выброс вредных веществ при сгорании различных топлив [9]

Виды топлива	Выброс вредных веществ, г/км		
	CO	CH	NO _x
Бензин	42	8,5	9,1
Сжиженный нефтяной газ	19	4,8	8,7
Сжатый природный газ	8,5	4,5	8,5
Бензин в смеси с водородом	3	2,8	4,55
Метанол	28	4,6	4,4
Метанол в смеси с бензином	32	5,4	7,6
Метанол в смеси с синтез-газом (H ₂ +CO)	5	2,5	3,5
Синтез-газ (H ₂ +CO)	0	0,4	2,3
Водород	0	0	2,5
ЕВРО-1	2,72	0,93	-

Из табл. 1 следует, что из широкого перечня моторных топлив смеси бензина с водородом соответствуют европейскому стандарту ЕВРО-1. При этом расход бензина снижается на 30-40%. Наиболее низкое содержание NO_x в продуктах сгорания наблюдается при нагрузках менее 50% максимальной мощности [8], т.е. при рабочих параметрах двигателя, представляющих наибольший интерес для условий городской эксплуатации автомобилей. Однако наиболее перспективным представляется использование водорода как основного топлива [1, 4, 5].

Поскольку водород обладает широкими концентрационными пределами распространения пламени, низкой энергией зажигания и другими пожароопасными свойствами, использование его на транспорте требует соблюдения определенных мер безопасности.

На сегодняшний день существует много [1, 7–9,19] работ, в которых говорится о пожаровзрывоопасности автомобильного транспорта, использующего водород в качестве топлива. Однако всем работам присущ недостаток, а именно, декларативность предоставляемой информации.

Постановка задачи и ее решение. Целью данной работы является определение пожаровзрывоопасных этапов в процессе эксплуатации автомобильного транспорта, использующего водород.

Одним из ключевых моментов эксплуатации автомобиля является его заправка водородом, в результате чего будут изменяться параметры системы хранения водорода (температура, давление, ее масса). Кроме того, во время этого процесса происходит стыковка автомобиля с заправочным оборудованием, что может привести к истечению водорода и к ПВО ситуации.

В 2008 году количество заправочных станций составляло 175 шт. Планировалось строительство еще 108 заправочных станций [10].

На рис. 3 приведена классификация водородных заправочных станций.

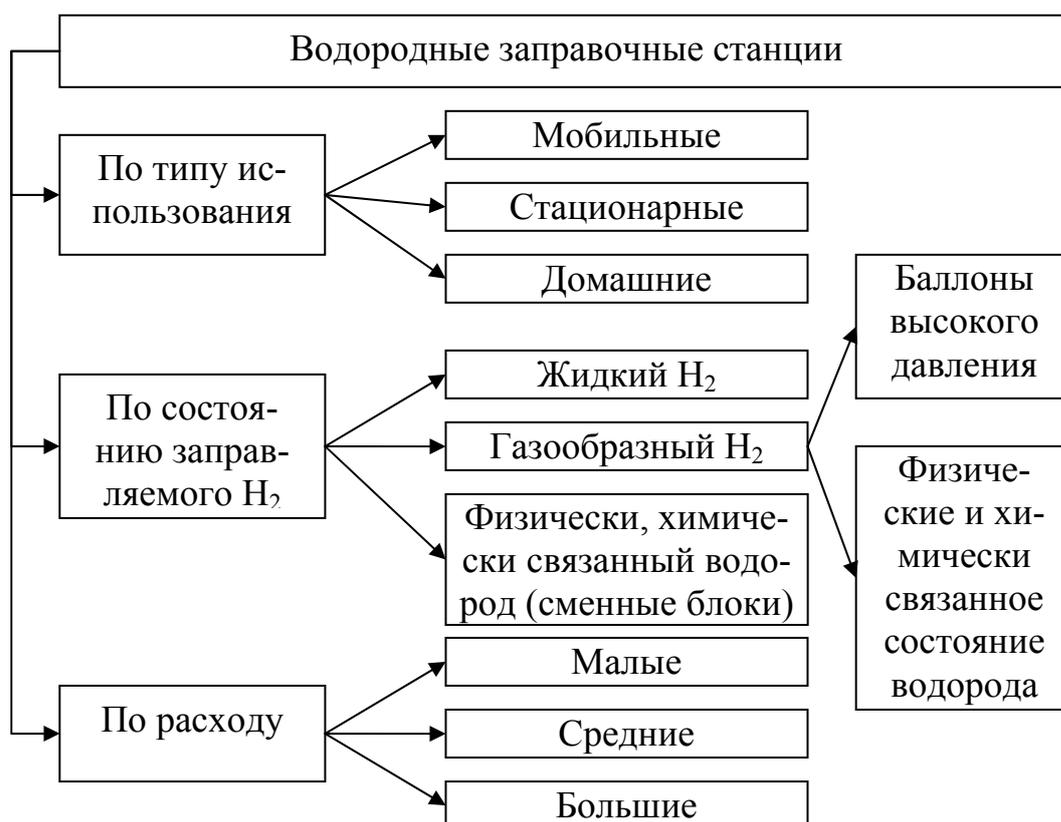


Рис. 3 – Классификация водородных заправочных станций

Мобильные станции предназначены для заправки техники в местах, где нет другой водородной инфраструктуры, т.е. стационарных заправочных станций, которые предназначены для продажи водорода, произведённого на самой станции или в другом месте. Некоторые из них располагаются на химических производствах, где производят или получают водород в виде побочного продукта основного производства.

Домашние заправочные станции создаются в качестве решения проблемы отсутствия водородной инфраструктуры. Они могут производить (200 ÷ 1000) кг водорода в год, что достаточно для заправки 1-5 автомобилей в сутки. Водород может производиться путем электролиза воды в ночное время, что позволит сгладить пики потребления электроэнергии.

Малые заправочные станции производят до 20 кг водорода в день, что позволяет обслужить до 10 легковых автомобилей в день. Средние – (50 ÷ 1250) кг водорода в день, что позволяет обслужить до 250 легковых автомобилей или до 25 автобусов в день. Большие – 2500 кг водорода в день (и более), что позволяет обслужить до 500 легковых автомобилей или до 50 автобусов в день.

На рис. 4 представлены действующие водородные заправочные станции.



Рис. 4 – Фотографии действующих водородных АЗС

Использование водорода влечет за собой необходимость наличия системы хранения водорода на автотранспортных средствах. Классификация возможных способов хранения приведена на рис. 5.



Рис. 5 – Способы хранения водорода

В соответствии с рис. 5 в табл. 2 приведены характеристики систем хранения и подачи водорода как действующих, так и тех, которые находятся на стадии разработки.

Таблица 2 – Характеристики способов хранения водорода

	Метод хранения водорода	Обрати- мость	Т, К	Р, МПа	Вес СХП на 1 кг H ₂	Возможность получения расхода H ₂ г/с (л/с)	
						2 (44,8)	0,5 (11,2) 0,1 (2,24)
1	Сжиженное состояние	+	-253	0,2 ... 0,3	10,3 [11] 7,7 [12] 14,6 [14]	Для получения H ₂ необходим источник тепла + + +	
2	Газообразное состояние	+	228...338	20; 25; 35 70; 70	66 [14]; 42 [16]; 33 [13] 19,2 [14]; 16,7 [12]	+ + +	
3	Кристаллические микропористые металлоорганические каркасы	+	298 70	2 2	100 [19] 22 [19]	На стадии разработки	
4	Нанотрубки	+	298 77	0,1 0,1	200 [19] 22 [19]	На стадии разработки	
5	Стекланные микросферы	+	473...673	35-65	10 [14]	На стадии разработки	
6	Нановолокна	+	298 77	10 0,65	142 [19] 28,6 [19]	На стадии разработки	
7	Гидриды AlH ₃	-	373	0,5	14 [14]*	+ + +	
8	Обратимые гидриды ИМС MgH ₂ LaNi ₅ H La(Ce, Mm)Ni ₅	+	573		13,5 [14]		
			298...373 273...363		67 [14]; 71 [12] 146 [15]; 140 [15]	+ + +	
9	Фуллерены	+	400	10	15,8 [19]	На стадии разработки	
10	Гидроксилирующие составы NaAlH ₄	-+	373	4	25,4 [14]	+ + +	
11	Кладратные гидраты	+	160	>100	19,2 [18]		
			233...283 73	20-200 1800	40 [20] 10 [20]	На стадии разработки	
12	Криогенные резервуары высокого давления [7]	+	20	24,8		На стадии разработки	

Из табл. 2 следует, что часть способов хранения находятся на стадии разработки и зачастую характеризуются такими параметрами, которые можно создать лишь в лабораторных условиях. Приемлемыми и используемыми в настоящее время являются системы хранения водорода в сжатом, криогенном виде и в химически связанном состоянии (гидриды интерметаллидов). В частных случаях возможно применение гидридов и гидрореагирующих составов.

На рис. 6 приведена классификация установок преобразования энергии, выделяемой в процессе взаимодействия водорода с кислородом, в другие виды энергии на автомобиле.

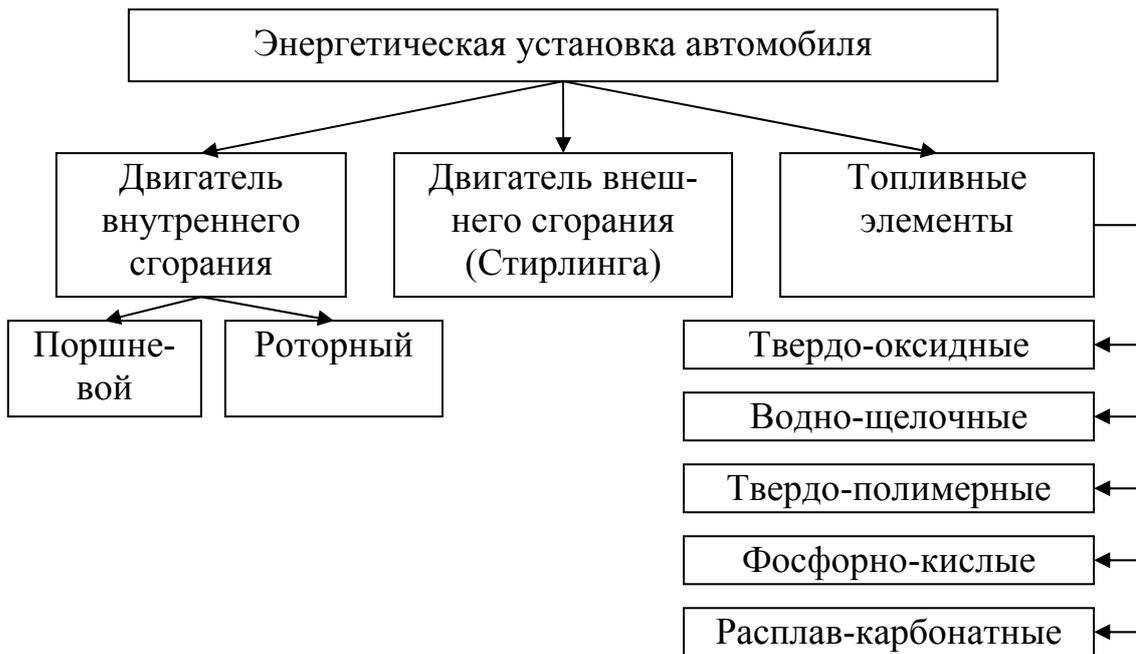


Рис. 6 – Преобразование энергии на автомобиле

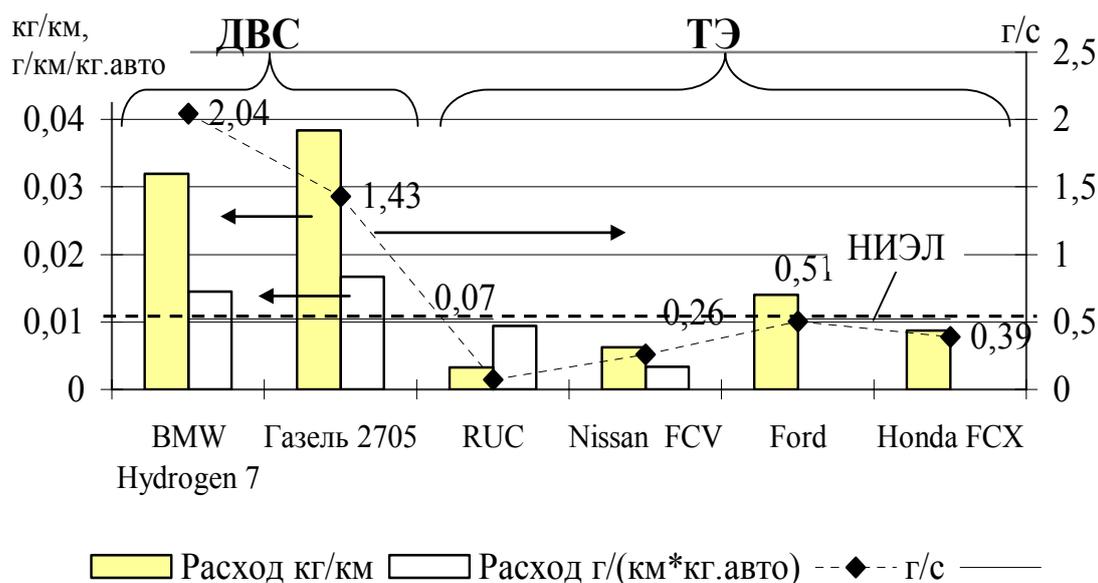


Рис. 7 – Расходные характеристики автомобилей, использующих водород

Из рис. 6 следует, что существует три принципиально разных способа преобразования энергии, из которых двигатель внешнего сгорания рассматривается как принципиально возможный вариант, недостатком которого является большая масса системы охлаждения.

Анализ существующих автомобильных средств, использующих водород в качестве топлива, позволил представить расходные характеристики этих систем в виде гистограммы рис. 7.

Из рисунка следует, что автомобили с ДВС имеют расходные характеристики в несколько раз хуже, нежели автомобили на топливных элементах и принятый показатель Национальной исследовательской энергетической лабораторией (НИЭЛ) США (потребление водорода — 1 кг H_2 на 60 миль пробега) [21].

В табл. 3 приведены характеристики топливных элементов [8].

Таблица 3 – Характеристики ТЭ различных типов

Тип топливного элемента		Водно-щелочный	Твердо-полимерный	Фосфорно-кислый	Расплав-карбонатный	Твердо-оксидный
КПД производства	реализованный	50-65	50-65	40-55	40-55	40-50
	перспективный	70	70	60	60-70	55-70
электроэнергии, %						
Рабочая температура, °С		80....100	40....100	180..250	600....800	800....1000
Плотность тока, А/см ²		≥1	≥1	<0,5	<0,5	<0,5
Достигнутый ресурс, ч		<20000	>50000	>60000	<20000	>50000

Из таблицы следует, что для автомобильного транспорта наиболее приемлемыми являются твердо-полимерные топливные элементы, у которых высокая плотность тока и невысокая рабочая температура, что немаловажно с точки зрения пожаровзрывоопасности. Недостатком водно-щелочного ТЭ является тот факт, что для реакции с водородом необходим чистый кислород.

В табл. 4 показаны основные причины и возможные последствия аварийных ситуаций на различных этапах функционирования автомобиля.

Таблица 4 – Причины и возможные последствия аварийных ситуаций на различных этапах функционирования автомобиля

Этап	Причина	Последствия
Заправка H ₂ в автомобиль	Некорректная стыковка с заправочным оборудованием	Утечка водорода, пожар, взрыв
	Повышенное давление в заправочной системе	Разгерметизация СХП и магистралей к ней
	Заправка водорода с примесями	Взрыв, засорение фильтров, ТЭ
Подключение блока с H ₂ к автомобилю	Некорректная стыковка с оборудованием	Утечка водорода, пожар, взрыв
Хранение H ₂ на автомобиле	Повышенная температура, давление в СХП	Разгерметизация бака и магистралей к нему, пожар, взрыв
	Накопление в СХП водорода примесей	Взрыв, засорение фильтров, ТЭ
	Утечки водорода через стенки СХП	Накопление водорода, пожар, взрыв
Использование H ₂ в автомобиле	Неисправность аппаратуры, понижающей давление	Разгерметизация магистралей, пожар, взрыв
Отключение блока с H ₂ от автомобиля	Выброс газа	Пожар, взрыв
Утилизация H ₂ с автомобиля	Розлив, выброс газа	Пожар, взрыв
Аварийный режим эксплуатации автомобиля	ДТП, пожар при ДТП, механическое повреждение СХП	Повышение давления, выброс газа, пожар, взрыв

Анализ таблицы показывает, что возникновение пожаровзрывоопасной ситуации возможно на каждом из этапов эксплуатации автомобиля, что обусловлено характеристиками водорода (рис. 8) [7].

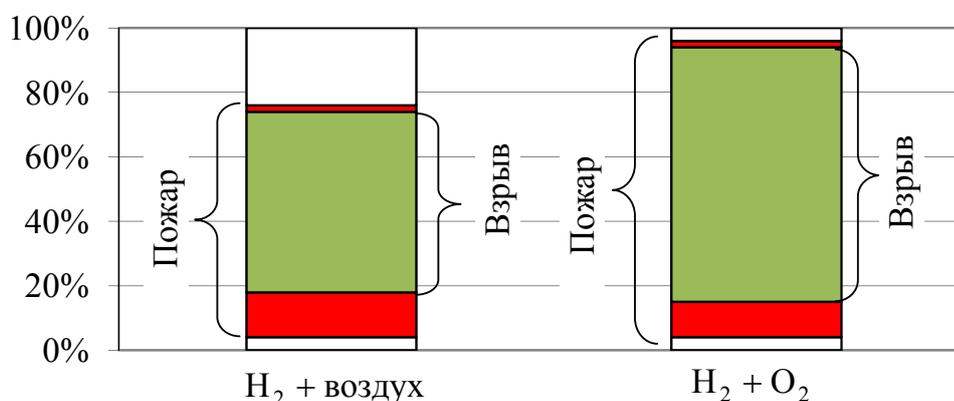


Рис. 8 – Пожаровзрывоопасные смеси водорода

Анализ рис. 8 показывает, что нижние концентрационные пределы распространения пламени (НКПРП) для водорода в воздухе и кислороде практически равны между собой, в то время как верхние концентрационные пределы распространения пламени (ВКПРП) отличаются на 20%. Также из рисунка следует, что ВКПРП, при которых возможен пожар, отличаются всего на 2% от концентраций, при которых возможен взрыв. Однако для нижних концентраций такая незначительная разница уже не наблюдается, и она уже составляет более 10%. Таким образом наиболее опасной, с практической точки зрения, является ситуация при которой достигается нижний концентрационный предел распространения пламени водорода с воздухом.

На основе вышеизложенного, фазы пожаровзрывоопасности автомобильного транспорта, использующего водород, можно представить в следующем виде (рис. 9).

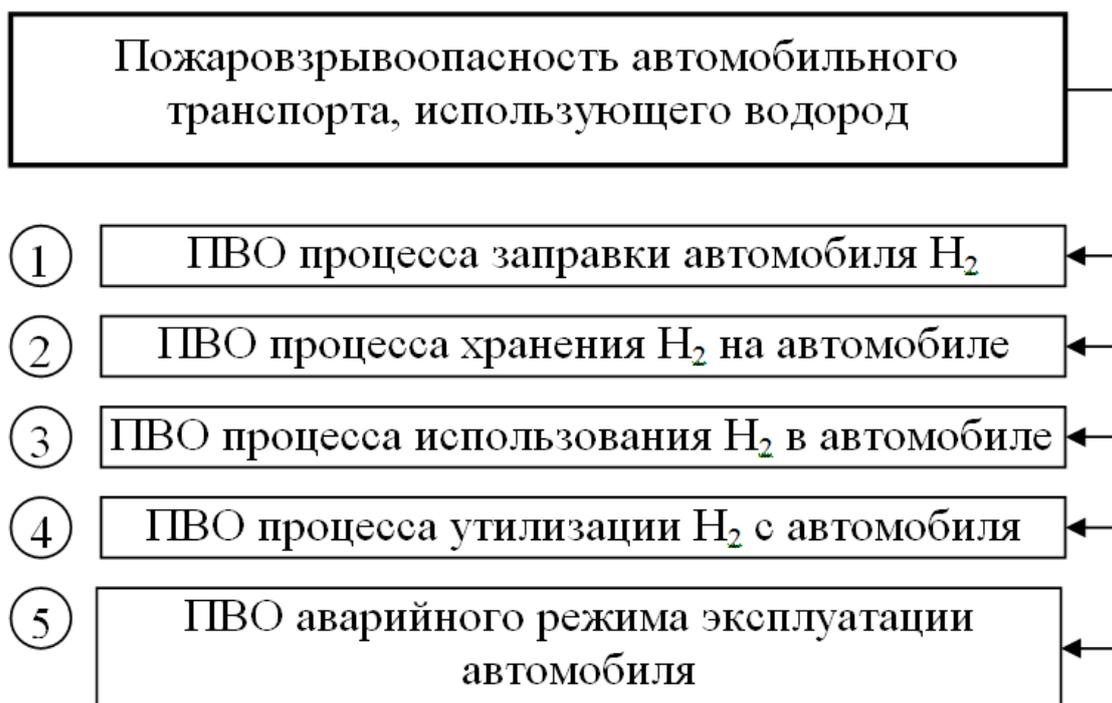


Рис. 9 – Пожаровзрывоопасность автомобильного транспорта, использующего водород

Выводы. Определены пожаровзрывоопасные фазы в процессе эксплуатации автомобильного транспорта, использующего водород. В зависимости от типа силовой установки определены расходные характеристики автомобильного транспорта по водороду. Показаны причины и возможные последствия аварийных ситуаций на различных этапах функционирования автомобиля.

ЛИТЕРАТУРА

1. Россия: стратегия перехода к водородной энергетике / Б.Н. Кузык, Ю.В. Яковец; Авт. предисл. С.М. Миронов – М.: Институт экономических стратегий, 2007. – 400 с.
2. Высокие технологии, водородная энергетика, платиновые металлы. Сборник документов и материалов традиционного "круглого стола", посвященного Дню космонавтики. МИРЭА, АСМИ, 2005. — 288 с.
3. Н.Н. Пономарев-Степной, А.Я. Столяревский. Атомно-водородная энергетика — пути развития, «Энергия», 2004, № 1, с. 3-9.
4. Водородная энергетика и топливные элементы – взгляд в будущее: Заключительный отчет экспертной группы Евросоюза, 2003 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: www.ioffe.rssi.ru/FuelCells/FC-final.pdf.
5. Водородная энергетика и топливные элементы [Электронный ресурс] / Г.А. Месяц, М.Д. Прохоров // Вестник Российской академии наук – 2004. – № 7. – С. 579 – 597. – Режим доступа: http://vivovoco.rsl.ru/VV/JOURNAL/VRAN/2004/04_07/HYDRO.HTM.
6. В.М. Ажажа, М.А. Тихоновский, А.Г. Шепелев. Материалы для хранения водорода. Анализ тенденций развития на основе данных об информационных потоках. // Вопросы атомной науки и техники. 2006. № 1. С.23-27.
7. Водород. Свойства, получение, хранение, транспортировка, применение: Справочное издание / Д.Ю. Гамбург, В.П. Семенов, Н.Ф. Дубовнин и др.: под ред. Д.Ю. Гамбурга, И.Ф. Дубовнина, - М.:Химия, 1989. – 672 с.
8. Мищенко А.И. Применение водорода для автомобильных двигателей. Киев: Наукова Думка, 1984. – 281 с.
9. Крутнев В.Ф., Каменев В.Ф. Перспективы применения водородного топлива для автомобильных двигателей//Конверсия в машиностроении.1997. №6. С.73-79.
10. Fifteen New Hydrogen Refuelling Stations in 2008 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://fuelcellworks.com/news/2009/05/07/fifteen-new-hydrogen-refuelling-stations-in-2008-worldwide>.
11. Hydrogen is often advocated as an energy medium [Электронный ресурс] / John McCarthy – Режим доступа: <http://www-formal.stanford.edu/jmc/progress/hydrogen.html>.

12. Асланян Г.С. Реутов Б.Ф. Проблематичность становления водородной энергетики // Теплоэнергетика: Сб. науч. тр. – Вып. 4. – 2006. – С. 66–73.
13. Водород на транспорте [Электронный ресурс] / Н.В. Болбас // – Режим доступа: <http://engine.aviaport.ru/issues/38/page34.html>.
14. Б. П. Тарасов, В. В. Бурнашева, М. В. Лотоцкий, В. А. Яртысь Методы хранения водорода и возможности использования металлогидридов // Альтернативная энергетика и экология: Международный научный журнал. – Вып. 12. – Саров, 2005. – С.14 – 37.
15. Разработка высокоэффективных водород-аккумулирующих материалов и технологии создания на их основе безопасных и компактных систем хранения и очистки водорода для обеспечения работы топливных элементов : (Отче по Государственному контракту № 02.516.11.6033) [Электронный ресурс] / Б.П. Тарасов // Презентация ppt. – Режим доступа: <dis.informika.ru/images/nano/02.516.11.6033.ppt>.
16. Левтеров А.М., Савицкий В.Д. Экспериментальный образец водородного автомобиля на базе модели ГАЗ-2705 // Автомобильный транспорт: Сб. науч. тр. ХНАДУ. – Вып. 22. – Харьков, 2008. – С.17 – 23.
17. Aceves S. M., Martinez-Frias J., Garsia-Villazana O., Espinosa-Loza F. Performance and certification testing of insulated pressure vessels for vehicular hydrogen storage // Proc. 2001 DOE Hydrogen Program Review, NREL/CP-570-30535.
18. Манаков А.Ю., Скиба С.С. Использование клатратных соединений для хранения водорода.// Рос.хим. ж. об-ва им. Д.И. Менделеева, 2006. – т.Л. №6. – С.73-82.
19. Материалы для водородной энергетики [Электронный ресурс] // Режим доступа: http://elar.usu.ru/bitstream/1234.56789/1468/4/1334893_methodinst.pdf.
20. Ефимченко В.С. Фазовые превращения в системе вода-водород при высоких давлениях: автореф. дис. на соиск. уч. степени канд. физ.-мат. наук : спец. 01.04.07 „Физика конденсированного состояния” / В.С. Ефимченко. — Черноголовка, 2008. — 24 с.
21. Водородный транспорт [Электронный ресурс] // Электронная энциклопедия. – Режим доступа: http://ru.wikipedia.org/wiki/Водородный_транспорт.
nuczu.edu.ua

Кривцова В.І., Ю.П. Ключка

Особливості використання водню на автомобільному транспорті

Визначені пожежовибухонебезпечні фази у процесі експлуатації автомобільного транспорту, що використовує водень. У залежності від типу силової установки визначені витратні характеристики автомобільного транспорту по водню. Наведені причини та можливі наслідки аварійних ситуацій на різних етапах функціонування автомобіля, що використовує водень.

Ключові слова: водень, автомобіль, система зберігання водню, витрата палива, пожежовибухонебезпека.

V.I. Krivtsova, Yu.P. Kluchka

Features of using hydrogen at motor transport.

Fire dangerous phases are certain in the process of exploitation of motor transport, using hydrogen. Depending the type of power-plant descriptions of expenses motor transport are certain on hydrogen. Reasons and possible consequences of emergency situations are shown on the different stages of functioning of car, which is using hydrogen.

Key terms: hydrogen, car, system of hydrogen storage, expense of fuel, fire dangerous.