

УДК 614.841.12

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАЖИГАНИЯ ГОРЮЧИХ ГАЗОВЫХ СМЕСЕЙ ФРИКЦИОННЫМИ ИСКРАМИ

А. Ю. Шебеко, Ю. Н. Шебеко, А. В. Зубань, Н. В. Голов

ВНИИ противопожарной обороны МЧС России, 143903 Балашиха, ay_shebeko@mail.ru

Приведены методика испытаний конструкционных материалов на искробезопасность и результаты ее апробации на примере нескольких пар материалов и образцов горючих газов и паров. В качестве горючих газов и паров были использованы водород, ацетилен, пары бензина АИ-92, метан и сжиженный углеводородный газ, в качестве конструкционных материалов — образцы из различных видов стали, а также из алюминия и латуни.

Ключевые слова: фрикционные искры, парогазовая смесь, искробезопасность, конструкционные материалы.

DOI 10.15372/FGV20180302

ВВЕДЕНИЕ

Известно, что фрикционные частицы, образующиеся в результате относительного перемещения двух контактирующих поверхностей, в зависимости от их дисперсности, начальной температуры, наличия окислителя и других факторов могут разогреваться до температуры видимого свечения. Частицы вещества, образующиеся в результате трения или соударения и раскаленные до температуры видимого свечения, принято называть фрикционными искрами. Фрикционные искры являются одним из распространенных источников зажигания взрывоопасных сред.

Существуют нормативные документы [1–3] по применению искробезопасных материалов во многих видах работ. При этом отсутствуют нормативные документы по проведению оценки искробезопасности материалов. В результате возникают ситуации, когда ряд сплавов на основе металлов с низкими твердостью и температурой плавления (например, сплавы цинка и алюминия, бериллия и меди) полагают искробезопасными без достаточных на то оснований и используют их в качестве искробезопасных покрытий для рабочих частей механизмов. Так, например, происходит с инструментом, изготовленным из сплава меди и бериллия, который небезопасен при ударе о ржавые детали из малоуглеродистой стали, загрязненные алюминием [4]. Всё это обуславливает актуальность разра-

ботки методики оценки искробезопасности материалов.

Как показал анализ, общепринятые международные или национальные стандарты, регламентирующие методы испытания конструкционных материалов на фрикционную искробезопасность, отсутствуют в развитых странах. В Российской Федерации имеется стандарт [5], применимый лишь для материалов оболочек взрывозащищенного электрооборудования. В то же время хорошо зарекомендовала себя на практике методика [6], применимая и к другим, не рассмотренным в [5] материалам. В настоящей работе ставится задача совершенствования этой методики на основе имеющегося международного и отечественного опыта. На базе усовершенствованной методики может быть разработан национальный стандарт, регламентирующий испытания материалов на фрикционную искробезопасность. Кроме того, представляет интерес дальнейшее исследование особенностей зажигания парогазовых смесей искрами от удара и трения.

АНАЛИЗ ОПУБЛИКОВАННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ЗАЖИГАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ФРИКЦИОННЫХ ИСКР

Анализ ранних работ по изучению зажигающей способности искр от удара и трения опубликован в работе [7]. Ниже в дополнение к нему дан анализ современных исследований в указанной области.

Механические искры от удара и трения в 30 ÷ 50 % случаев являются источниками пожаров и взрывов, и эта тенденция со временем практически не меняется. Это во многом объясняется слабой изученностью такого рода источников зажигания. В работе [8] исследовались механизмы диссипации механической энергии в тепло при ударе и трении, а также вероятные механизмы зажигания газовых смесей фрикционными искрами.

В экспериментах [8] использовалась установка с вращающимся колесом диаметром 10 или 30 см, которая соприкасалась с горизонтальной площадкой размерами 7 × 7 или 25 × 25 мм. Скорость вращения колеса в месте соприкосновения варьировалась в диапазоне 0.2 ÷ 20 м/с при нагрузке 5 000 Н. Температура плоской площадки измерялась термомпарами и инфракрасным пирометром. Колесо изготавливалось из закаленной стали, площадка — из закаленной или незакаленной стали, алюминия, сплава алюминия и бронзы, кварца. По оценкам авторов давление в контактной зоне составляло несколько мегапаскалей. Температура горизонтальной поверхности площадки в зависимости от приложенной мощности (до 4 кВт) достигала 1 000 °С для колеса диаметром 30 см и 500 °С для колеса диаметром 10 см. Согласно оценкам авторов около 80 % выделяющейся при трении тепловой энергии рассеивается путем теплопроводности. Размер образующихся при трении твердых нагретых частиц составлял несколько сотен микрометров. Масса этих частиц («искр») была не менее 0.07 г в зависимости от условий трения и вида материала. Число образующихся частиц составляло несколько десятков в секунду. На их образование расходовалось около 1 % энергии трения.

Для изучения искр от удара использовали установку с мишенью в виде стальной пластины размерами 5 × 70 × 45 см и ударяющим по ней телом. Мишень была наклонена под углом 60°, что обеспечивало оптимальные условия искрообразования. Ударяющее тело представляло собой стержень диаметром 18 мм и длиной 5 и 20 см из стали, меди и алюминия. Скорость соударения варьировалась в диапазоне 5 ÷ 50 м/с. Процесс соударения регистрировали скоростной кинокамерой (100 ÷ 8 000 кадр/с).

Найдено [8], что температура в месте соударения может подниматься до 600 ÷ 700 °С и

затем существенно падать в течение 2 ÷ 3 мс. Типичное давление при соударении достигает сотен мегапаскалей, что на два порядка выше, чем при трении, за счет чего кратковременно реализуются указанные высокие температуры. При соударении образуется, как правило, одна частица размером 2 ÷ 4 мм, движущаяся со скоростью, близкой к скорости падающего тела. Температура при соударении практически не зависит от длины стержня, а определяется скоростью соударения.

Зажигание при ударе и трении возможно в результате реализации процессов:

- (а) зажигания нагретой поверхностью в местах удара и трения;
- (б) нагрева газовой среды в ограниченном пространстве теплом, выделяющимся при ударе и трении;
- (в) зажигания искрами, образующимися при ударе и трении.

Основным является механизм (а). Как только температура поверхности превышает некоторое критическое значение (не менее 1 000 К), происходит зажигание. При этом критическая температура зажигающей поверхности не коррелирует ни со стандартной температурой самовоспламенения, ни с минимальной энергией зажигания. Обнаружено, что наиболее легко зажигаемая газовая смесь одна и та же по составу как при ударе, так и при нагревании поверхности иным источником (электрическим нагревом) и существенно отличается от стехиометрической, при которой энергия зажигания электрической искрой минимальна. Этот результат получен для смесей метан (7 %) — воздух и водород (10 %) — воздух. Температура зажигающей поверхности составляла 1 100 ÷ 1 400 °С для метановоздушной смеси и 800 ÷ 900 °С для водородовоздушной.

Механизм (б) похож на механизм (а), однако повышение температуры газовой среды вблизи места образования искр не превышает 40 °С, несмотря на то, что температура твердой поверхности может достигать 700 °С (т. е. механизм (б) практически нереализуем).

В случае механизма (в) искры могут вызвать воспламенение, если температура частицы существенно повысится за счет окисления металла. Нагретые частицы металла могут гореть при полете в воздухе. Однако в экспериментах [8] этого не зафиксировано даже в случае алюминия.

Таблица 1

Химический состав образцов [9]

Номер образца	Химический состав образца, %										Тип
	Si	Fe	Cu	Mn	Zn	Ni	Ti	Cr	Mg	Al	
1	11.5	0.9	0.3	0.4	0.3	0.1	0.2	0.2	0.2	Остальное	Al—Si
2	0.4	0.5	1.6	0.3	5.5	—	0.2	0.2	2.5	Остальное	Al—Mg—Zn
3	0.2	0.3	0.1	0.6	0.2	0.2	0.2	0.2	4.5	Остальное	Al—Mg
4	0.3	—	0.3	0.2	1.0	—	—	—	Остальное	3.0	Mg

На основании исследований в работе [8] сделаны следующие выводы:

1) в случае трения зажигание происходит почти исключительно в области поверхности, нагретой трением. Температура зажигания нагретой поверхностью не связана напрямую со стандартной температурой самовоспламенения. Мощность, рассеиваемая при трении, обычно составляет несколько процентов от полной мощности. Для соответствующего нагрева поверхности требуется не менее нескольких секунд. Максимальная температура в зоне соприкосновения трущихся поверхностей зависит только от мощности, рассеиваемой при трении, независимо от скорости движения;

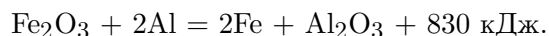
2) при ударе, как и в случае трения, зажигание вызвано нагретой за счет соударения поверхностью. При этом, как подчеркивают авторы [8], возможность зажигания определяется не кинетической энергией тела, а его скоростью;

3) образующиеся при трении и соударении «искры» обладают значительно меньшей зажигающей способностью по сравнению с нагретой поверхностью трущихся или соударяющихся тел. Определяющим параметром является температура нагретой поверхности.

В работе [9] изучено зажигание метановоздушных смесей фрикционными искрами легких металлов и сплавов. Авторы констатируют, что зажигание при трении обусловлено образованием нагретых поверхностей тел и «искр» (высокотемпературных твердых частиц трущихся материалов). Наиболее вероятно зажигание при трении поверхностей тел из легких сплавов и поверхностей ржавого железа. В работе [9] выполнены лабораторные эксперименты, в которых фрикционные искры создавались при свободном падении тестируемого образца на поверхность ржавого железа. Состав четырех испытываемых образцов указан в табл. 1. По-

мимо них, изучен образец из сплава 1 с небольшой добавкой Ве. Длина образцов составляла 50 мм, диаметр 60 мм. Энергия соударения регулировалась массой груза и высотой падения. Пластина из ржавого железа имела размеры 400 × 160 мм и толщину 12 мм. Ржавчина на ней образовывалась в течение шести недель. Образец и пластину размещали во взрывной камере объемом 1 м³. В камеру подавали требуемое количество метана, и смесь перемешивали вентилятором. Образец падал на пластину под углом около 45°, максимальная высота падения составляла 4 м.

Вначале проводили опыты без метана. Образование искр регистрировали с помощью кинокамеры. С использованием инфракрасного анализатора установлена температура искр — 1 850 ÷ 2 100 К, время их жизни 0.02 с. В процессе полета частицы охлаждались. Нагрев частиц при трении вызван не только переходом механической энергии в тепло, но и химической реакцией алюминия со ржавым железом:



Результаты измерения в [9] частоты зажигания в зависимости от высоты падения груза массой 14 кг и состава смеси показали, что легче всего зажигались бедные смеси с содержанием метана 6.5 ÷ 7 %. Вероятная причина этого — дополнительный по отношению к горению метана кислород потребляется окисляющимися искрами. При высоте падения груза 4 м максимальная по концентрации метана частота зажигания близка к 90 %, при высоте падения 3 и 2 м — соответственно 60 и 25 %. Частота зажигания зависит от шероховатости поверхности стальной пластины и максимальна при шероховатости 1.2 мм. Влияет на частоту зажигания также масса груза, и при массе менее 5 кг и высоте падения до 4 м зажигание не происходит. Авторы [9] пришли к выводу, что

частота зажигания определяется не отдельно массой груза и высотой падения, а зависит от потенциальной энергии груза.

Из исследованных в [9] образцов наиболее опасен по зажигающей способности образец 4 (см. табл. 1). Чем меньше Mg в сплаве с Al, тем ниже зажигающая способность. Это обусловлено тем, что Mg при реагировании со ржавчиной выделяет больше тепла, чем Al. Влияние Zn сильнее, чем влияние Mg. Добавки Be повышают зажигающую способность фрикционных искр.

По результатам работы [9] сделаны следующие выводы:

- 1) соударение предметов из легких сплавов и стали имеет высокую зажигающую способность в силу образования высоконагретых поверхностей в результате возможного протекания термитных реакций (реакции легких металлов со ржавчиной);

- 2) высота падения груза является одним из важных параметров, определяющих зажигающую способность;

- 3) энергия соударения, обеспечивающая 50%-ю вероятность зажигания, может быть использована для оценки зажигающей способности;

- 4) наличие магния в сплавах легких металлов существенно повышает зажигающую способность.

Работа [10] посвящена исследованию влияния материала подошвы рабочей обуви и пола на воспламенение газов и паров фрикционными искрами. При трении материалов образуются нагретые поверхности, а также нагретые частицы трущихся материалов, которые при разлете в атмосфере могут окисляться с дополнительным тепловыделением. В обоих случаях образуются потенциальные источники зажигания, при этом легче всего зажигаются бедные газовые смеси. Фрикционные искры с высокой зажигающей способностью возникают обычно в случае легких металлов (сплавы церия, алюминия, магния, титана) и реже в случае тяжелых металлов (гафний, цирконий).

В настоящее время отсутствует систематическая классификация горючих газов и паров по воспламеняемости фрикционными искрами. С определенным приближением может применяться классификация, связанная со взрывозащищенным оборудованием. Так, смесь пропан — воздух (группа ПА) легче воспламеняется, чем метан — воздух (группа I). Смесь

воздуха с этиленом (группа ПВ) опаснее, чем с пропаном, а смесь воздуха с водородом (группа ПС) опаснее, чем с этиленом.

Наиболее легко зажигаются фрикционными искрами смеси, бедные по составу или близкие к нижнему концентрационному пределу. То же самое относится и к зажиганию нагретыми поверхностями.

В [10] проведены эксперименты, имитирующие зажигание фрикционными искрами, образующимися при соприкосновении обуви с полом (типичная скорость скользящего удара 7.6 м/с). Ударник двигался по окружности диаметром 0.91 м и осуществлял скользящий удар по исследуемому образцу — мишени, шириной 75 мм, выполненной из стали и карбида вольфрама. Проведено 500 соударений со скоростью 9.4 м/с и 500 соударений со скоростью 6.4 м/с. По оценкам авторов в тепло переходит около 1/3 энергии соударения. Содержание метана в воздухе составляло 7 %. Установлено, что в случае кварцевой плитки частота зажигания значительно выше, чем при трении с поверхностью металла.

В работе [10], как и в [9], сделан вывод, что относительно высокая опасность искрообразования легких металлов обусловлена протеканием термитной реакции со ржавчиной. Металлы с низкой температурой плавления чаще всего искробезопасны. Наиболее искроопасны материалы, дающие при столкновении с твердыми поверхностями горящие частицы: титан, церий, гафний, цирконий. Далее идут магний и его сплавы, также из-за протекания термитной реакции со ржавым железом, а затем следует алюминий. Метановоздушные смеси практически не зажигаются при соударении стальных поверхностей (даже ржавых), вероятность зажигания не выше 0.02. Для этиленовоздушных смесей вероятность зажигания существенно выше. Если стальные поверхности контактируют при ударе со строительными материалами (гранит, кирпич, асфальт и т. п.), риск зажигания метановоздушных смесей мал, но возможно зажигание смесей C_3H_8 — воздух и весьма вероятно зажигание смесей C_2H_4 — воздух.

В работе [11] изучено зажигание газовоздушных смесей искрами, образующимися при ударе. При энергии удара до 240 Дж достигнуто зажигание пропановоздушной смеси. Смесь паров бензина с воздухом зажгли при энергии 177 Дж при столкновении двух образцов

из высокоуглеродистой стали. Для зажигания водородовоздушной смеси потребовалась энергия соударения всего лишь 3.4 Дж. Такие материалы, как сплавы алюминия с бронзой, меди с бериллием и никеля с медью и кремнием, вызывали зажигание водородовоздушной смеси при соударении со ржавым железом.

В работе [12] описан способ испытания на фрикционную искробезопасность образцов из легких сплавов. Он заключается в том, что испытуемый образец, соединенный с грузом заданной массы, сбрасывается с определенной высоты на ржавую стальную плиту, установленную под углом 50° к горизонту в метановоздушной среде, содержащей 7.5 % метана, и по реакции этой среды на выделение энергии в месте удара судят об искробезопасности испытуемого сплава. Поверхность плиты увлажняют, измеряют площадь следа, образовавшегося в результате удара образца о поверхность. При невоспламенении смеси в камере и при площади следа менее 25 мм^2 сплав относят к искробезопасным. При площади следа более 25 мм^2 на след, оставленный при первом сбрасывании, сбрасывают ржавый стальной образец, аналогичный образцу из испытываемого сплава, и при невоспламенении сплав относят к искробезопасным, в противном случае — к искроопасным.

В стандарте [5] описана методика испытаний на искробезопасность материалов для электрооборудования. Данная методика применяется для испытания оболочек из легких сплавов в горючих средах; в средах, обогащенных кислородом; при одиночных ударах; в результате трения и быстро чередующихся ударов. В основе экспериментальной системы может быть установка с падающим грузом либо установка с вращающимся диском.

Для установки с падающим грузом моделирование процесса искрообразования обеспечивается формой поверхности груза (цилиндр, конус, сфера), энергией и относительной скоростью перемещения деталей в момент соударения. Для установки с вращающимся диском для заданной пары материалов моделирование процесса искрообразования обеспечивается формой трущихся поверхностей деталей, относительной скоростью скольжения и усилием прижатия трущихся деталей для механизмов с амортизаторами.

При испытаниях на фрикционную искробезопасность интенсивно окисляющихся мате-

риалов применяют газозвушные смеси с содержанием горючих компонентов $5.5 \div 65$ % CH_4 или $10 \div 13$ % H_2 . Зажигающую способность фрикционных искр, образующихся при трении или соударении алюминия и его сплавов без защитных или с защитными покрытиями со ржавой сталью, а также фрикционных искр трудноокисляющихся материалов оболочек определяют в смесях с содержанием горючих компонентов $6.5 \div 7.5$ % CH_4 или $17 \div 20$ % H_2 . Оценка искробезопасности в отношении зажигающей способности активно окисляющихся частиц получена по результатам испытаний в обогащенных кислородом средах — до 25 ± 0.5 %.

Метод, аналогичный установке с вращающимся диском, описан в методике [6].

Проведенный анализ позволяет сделать вывод, что не существует универсального стандартизированного метода испытаний конструкционных материалов на искробезопасность. Недостаточно изученными остаются и механизмы зажигания парогазовых смесей искрами от удара и трения.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Как следует из проведенного обзора, при количественной оценке опасности воспламенения смесей фрикционными искрами следует исходить не из величины энергии ударника или деталей оборудования, а из скорости и массы соударяющихся предметов (инструмента, элементов технологического оборудования).

Анализ экспериментальных данных показывает, что при использовании ударного инструмента искры образуются при скоростях $10 \div 16$ м/с и выше, а при использовании вращающегося инструмента — при скоростях, превышающих $10 \div 20$ м/с, при этом механическое взаимодействие при вращении, как правило, характеризуется быстро чередующимися ударами.

Указанные факторы послужили исходными данными для создания установки по оценке искробезопасности материалов. Ее схема приведена на рис. 1.

Установка состоит из стальной цилиндрической емкости (1) с внутренним диаметром 380 мм и высотой 800 мм (объем ≈ 90 л). Емкость закрыта с нижней стороны, а с верхней имеет круглое отверстие диаметром 160 мм, закрываемое крышкой (7).

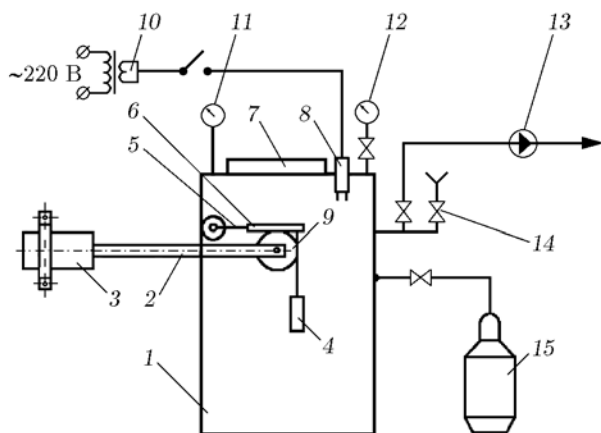


Рис. 1. Принципиальная схема экспериментальной установки:

1 — емкость, 2 — передаточный механизм, 3 — электродвигатель, 4 — прижимной механизм, 5 — держатель, 6 — исследуемый образец, 7 — крышка, 8 — свеча, 9 — исследуемый образец в виде диска с вырезанными сегментами, 10 — понижающий трансформатор, 11 — манометр, 12 — вакуумметр, 13 — вакуумный насос, 14 — вентиль, 15 — баллон с горючим газом

Исследуемый образец (6) крепится на подвижном держателе (5), и посредством прижимного механизма (4) достигается его плотный контакт с диском (9). Вращение диску передается от электродвигателя (3), расположенного на внешней стенке емкости с помощью передаточного механизма (2). Данное конструктивное решение позволяет исключить влияние искр, образующихся при трении щеток о якорь двигателя.

Газопаровоздушную смесь готовили в реакционном сосуде по парциальным давлениям газовых компонентов, определяемым вакуумметром (12). Разряжение в сосуде создавалось вакуумным насосом (13). Воспламенение регистрировалось манометром (11).

Если газозвудушную смесь зажечь не удавалось, проводили ее контрольное зажигание путем пережигания нихромовой проволоочки диаметром 0,3 мм и длиной 4 мм на свече (8) подачей напряжения 42 В с понижающего трансформатора (10).

Пробные эксперименты выполнены с диском правильной формы. На этой стадии экспериментов не удалось зажечь газовую смесь даже с водородом в качестве горючего. На второй стадии экспериментов с четырех сторон диска был спилен сегмент, что позволило получить механическое воздействие в виде быстро чере-

дующихся ударов. В результате было достигнуто зажигание газопаровоздушной смеси.

Образец исследуемого материала в этих экспериментах имел форму пластины размеров $140 \times 25 \times 7$ мм. Для увеличения кинетической энергии соударения на образец дополнительно помещали стальную пластину размеров $50 \times 25 \times 9$ мм. Суммарная масса соударяющегося образца составляла около 300 г. Диаметр вращающегося диска 100 мм, толщина 10 мм, масса 630 г. Срезаемый с четырех сторон диска сектор имел в основании 40 мм. Диск вращался с угловой скоростью до 11 000 об/мин, которая обеспечивала скорость соударения исследуемых материалов до 55 м/с.

Опыты проводили следующим образом. Исследуемый образец и вращающийся диск (далее по тексту — испытываемая пара) закрепляли в реакционном сосуде с необходимой силой (20 Н) прижатия исследуемого образца к диску. Крышку реакционного сосуда закрывали и герметизировали ввод вала электродвигателя в реакционный сосуд. Реакционный сосуд вакуумировали до остаточного давления не более 0,5 кПа. Горючую газовую смесь составляли по парциальным давлениям. Для свободного вращения вала электродвигателя ослабляли уплотнительную шайбу. Включали электродвигатель и фиксировали время t_3 до момента зажигания газовой смеси, которое регистрировали визуально и по показаниям манометра. Если смесь не воспламенялась в течение 1 мин, это фиксировали как отсутствие зажигания и вновь воспламеняли смесь с помощью контрольного источника зажигания. Для каждого состава горючей смеси процедуру испытаний повторяли $2 \div 5$ раз и определяли среднее время задержки зажигания \bar{t}_3 . Число соударений в единицу времени N находили по формуле

$$N = nk, \quad (1)$$

где n — число оборотов диска в единицу времени, s^{-1} ; k — число сегментов на диске, обуславливающих ударное соприкосновение образцов ($k = 4$). Вероятность зажигания P для испытываемой пары (исследуемого образца и вращающегося диска) вычисляли по формуле

$$P = 1/(\bar{t}_3 N). \quad (2)$$

На рис. 2 представлена полученная в настоящей работе зависимость частоты вращения диска от массы груза, осуществляющего прижатие образцов. При массе груза $m =$

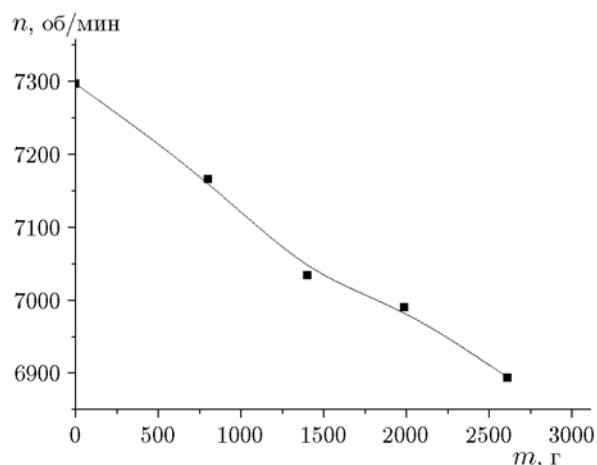


Рис. 2. Зависимость частоты вращения диска от массы груза, осуществляющего прижатие образцов

2000 г, использованной в дальнейших экспериментах, частота вращения составляла $n \approx 7000$ об/мин, что и было использовано при обработке экспериментальных данных.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты экспериментов представлены в табл. 2, а наиболее характерные данные — также на рис. 2–4.

Как следует из табл. 2, воспламенить удалось лишь смеси водорода и ацетилена с воздухом, при этом смеси метана, паров бензина АИ-92, паров сжиженного углеводородного газа (СУГ) с воздухом зажечь не удалось в случае указанных в таблице конструкционных материалов. Объяснить этот эффект на качественном уровне можно исходя из особенностей зажигания парогазовых смесей искрами от удара и трения, отмеченных в аналитическом обзоре. Согласно [8, 9] для использованной нами конфигурации взаимодействующих образцов основным параметром, определяющим возможность зажигания, является температура поверхности образцов. Она, в свою очередь, определяется материалом, размерами и формой образцов, скоростью вращения и силой прижатия и не зависит от свойств парогазовой среды.

В работе [13] отмечалось, что для зажигания парогазовых смесей необходимо создать такой объем смеси, который близок к толщине ламинарного фронта пламени δ , а температу-

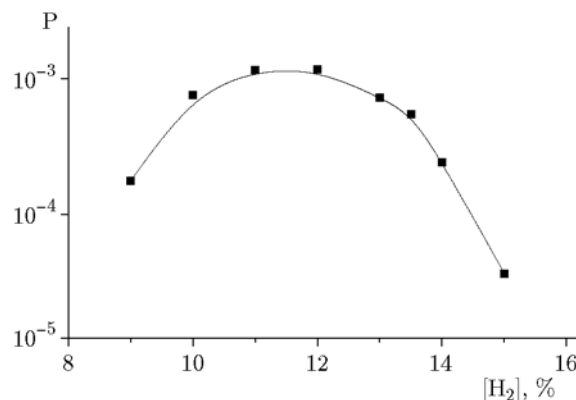


Рис. 3. Зависимость частоты зажигания водородовоздушных смесей от объемной концентрации водорода в воздухе фрикционными искрами при соударении образцов из малоуглеродистой стали и высокоуглеродистой термообработанной стали

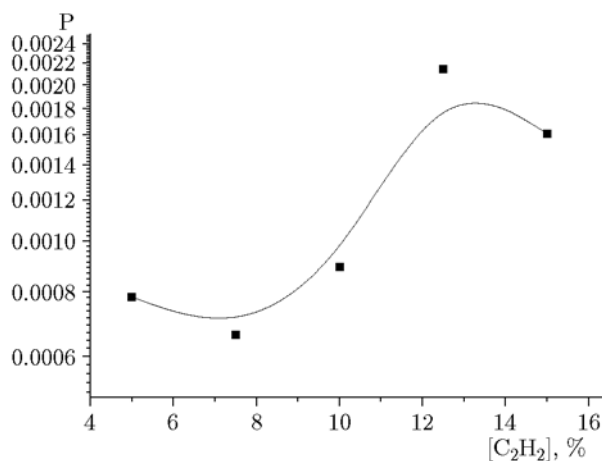


Рис. 4. Зависимость частоты зажигания ацетиленовоздушных смесей от объемной концентрации ацетилена в воздухе при соударении образцов из малоуглеродистой стали

ра парогазовой смеси в этом объеме должна быть не ниже температуры пламени. Величина δ обратно пропорциональна нормальной скорости горения парогазовой смеси S_u ($S_u \sim 1/\delta$). При этом чем выше скорость S_u , тем меньше может быть толщина фронта δ , необходимая для зажигания, т. е. тем легче зажигается парогазовая смесь. Нормальные скорости горения водорода и ацетилена существенно превышают соответствующие значения для метана, паров бензина и СУГ [14], что и обуславливает зажигание водорода и ацетилена и отсутствие зажигания прочих изученных в настоящей работе газов и паров. Зажигающая способность искр

Таблица 2

Экспериментальные данные по искробезопасности конструкционных материалов (результаты настоящей работы)

№ п/п	Материал 1	Материал 2	Горючий газ или пар	Концентрация горючего в воздухе, % (об.)	Наличие зажигания	Промежуток времени до зажигания, с	Частота зажигания
1	2	3	4	5	6	7	8
1	Сталь малоуглеродистая	Сталь высокоуглеродистая термообработанная	Водород	9.0	+ + -	9.0 8.0 2 раза	$1.8 \cdot 10^{-4}$
				10.0	+ + + +	4.5 2.5 3.0 3.0 2.0	$7.7 \cdot 10^{-4}$
				11.0	+ + + + +	2.0 1.0 4.5 3.5 1.5	$11.5 \cdot 10^{-4}$
				12.0	+ + + + +	1.2 1.8 2.0 2.0 3.0	$11.6 \cdot 10^{-4}$
				13.0	+ + + + +	3.0 3.5 3.5 3.0 2.0	$7.4 \cdot 10^{-4}$
				13.5	+ + + + +	6.0 4.0 3.0 7.0 2.5	$5.6 \cdot 10^{-4}$
				14.0	- + + + +	1 раз 10.0 7.0 6.0 7.0	$2.5 \cdot 10^{-4}$
				15.0	+ + + + +	6.0 10.0 9.0 6.0 4.0	$3.4 \cdot 10^{-5}$
2	Сталь малоуглеродистая	Сталь высокоуглеродистая термообработанная	Метан	6.0	-	5 раз	$<0.7 \cdot 10^{-5}$
				7.0	-	5 раз	$<0.7 \cdot 10^{-5}$
				8.0	-	5 раз	$<0.7 \cdot 10^{-5}$
3	Сталь малоуглеродистая	Сталь высокоуглеродистая термообработанная	Пары бензина АИ-92	1.0	-	5 раз	$<0.7 \cdot 10^{-5}$
				2.0	-	5 раз	$<0.7 \cdot 10^{-5}$
				3.0	-	5 раз	$<0.7 \cdot 10^{-5}$

1	2	3	4	5	6	7	8
4	Сталь малоуглеродистая корродированная	Алюминий	Водород	10.0	–	5 раз	$<0.7 \cdot 10^{-5}$
				12.0	–	5 раз	$<0.7 \cdot 10^{-5}$
				14.0	–	5 раз	$<0.7 \cdot 10^{-5}$
5	Сталь малоуглеродистая корродированная	Алюминий	Метан	6.0	–	5 раз	$<0.7 \cdot 10^{-5}$
				7.0	–	5 раз	$<0.7 \cdot 10^{-5}$
				8.0	–	5 раз	$<0.7 \cdot 10^{-5}$
6	Сталь малоуглеродистая корродированная	Алюминий	Пары бензина АИ-92	1.0	–	5 раз	$<0.7 \cdot 10^{-5}$
				2.0	–	5 раз	$<0.7 \cdot 10^{-5}$
				3.0	–	5 раз	$<0.7 \cdot 10^{-5}$
7	Сталь хромистая	Сталь высокоуглеродистая термообработанная	Метан	6.0	–	5 раз	$<0.7 \cdot 10^{-5}$
				7.0	–	5 раз	$<0.7 \cdot 10^{-5}$
				8.0	–	5 раз	$<0.7 \cdot 10^{-5}$
8	Сталь хромистая	Сталь высокоуглеродистая термообработанная	Пары бензина АИ-92	1.0	–	5 раз	$<0.7 \cdot 10^{-5}$
				2.0	–	5 раз	$<0.7 \cdot 10^{-5}$
				3.0	–	5 раз	$<0.7 \cdot 10^{-5}$
9	Сталь малоуглеродистая	Нержавеющая сталь	Водород	10.0	–	5 раз	$<0.7 \cdot 10^{-5}$
				12.0	–	5 раз	$<0.7 \cdot 10^{-5}$
				14.0	–	5 раз	$<0.7 \cdot 10^{-5}$
10	Сталь малоуглеродистая	Нержавеющая сталь	Метан	6.0	–	5 раз	$<0.7 \cdot 10^{-5}$
				7.0	–	5 раз	$<0.7 \cdot 10^{-5}$
				8.0	–	5 раз	$<0.7 \cdot 10^{-5}$
11	Сталь малоуглеродистая	Нержавеющая сталь	Пары бензина АИ-92	1.0	–	5 раз	$<0.7 \cdot 10^{-5}$
				2.0	–	5 раз	$<0.7 \cdot 10^{-5}$
				3.0	–	5 раз	$<0.7 \cdot 10^{-5}$
12	Алюминий	Алюминий	Водород	12.0	–	3 раза	$<1.2 \cdot 10^{-5}$
				15.0	–	3 раза	$<1.2 \cdot 10^{-5}$
				18.0	–	3 раза	$<1.2 \cdot 10^{-5}$
				21.0	–	2 раза	$<1.8 \cdot 10^{-5}$
				24.0	–	2 раза	$<1.8 \cdot 10^{-5}$
				27.0	–	2 раза	$<1.8 \cdot 10^{-5}$
				30.0	–	2 раза	$<1.8 \cdot 10^{-5}$
13	Алюминий	Алюминий	Пары СУГ	3.0	–	3 раза	$<1.2 \cdot 10^{-5}$
				5.0	–	3 раза	$<1.2 \cdot 10^{-5}$
				7.0	–	3 раза	$<1.2 \cdot 10^{-5}$
14	Латунь	Латунь	Водород	15.0	–	3 раза	$<1.2 \cdot 10^{-5}$
				18.0	–	3 раза	$<1.2 \cdot 10^{-5}$

1	2	3	4	5	6	7	8
15	Латунь	Латунь	Пары СУГ	3.0	–	2 раза	$<1.8 \cdot 10^{-5}$
				5.0	–	2 раза	$<1.8 \cdot 10^{-5}$
				7.0	–	2 раза	$<1.8 \cdot 10^{-5}$
16	Сталь малоуглеродистая корродированная	Сталь малоуглеродистая	Водород	8.0	+	2.0 2.0	$10.7 \cdot 10^{-4}$
				10.0	+	2.0 1.0	$16.5 \cdot 10^{-4}$
				12.0	+	2.0 11.0 10.0 3.0	$5.5 \cdot 10^{-4}$
				15.0	+	2.0 57.0 48.0 4.0	$6.1 \cdot 10^{-4}$
				18.0	–	2 раза	$<1.8 \cdot 10^{-4}$
				24.0	–	2 раза	$<1.8 \cdot 10^{-4}$
				30.0	–	2 раза	$<1.8 \cdot 10^{-4}$
17	Сталь малоуглеродистая	Сталь малоуглеродистая	Ацетилен	5.0	+	2.0 3.0	$8.9 \cdot 10^{-4}$
				7.5	+	2.0 15.0 49.0 12.0 21.0 7.0	$3.7 \cdot 10^{-4}$
				10.0	+	1.0 6.0	$12.5 \cdot 10^{-4}$
				12.5	+	4.0 2.0	$8.1 \cdot 10^{-4}$
				15.0	+	2.5 3.0	$7.9 \cdot 10^{-4}$
				20.0	–	2 раза	$<1.8 \cdot 10^{-5}$
18	Сталь малоуглеродистая	Сталь малоуглеродистая	Ацетилен	5.0	+	9.0 3.0 2.0 2.0	$7.8 \cdot 10^{-4}$
				7.5	+	3.5 3.0	$6.6 \cdot 10^{-4}$
				10.0	+	2.0 3.0	$8.9 \cdot 10^{-4}$
				12.5	+	1.0 1.0	$21.4 \cdot 10^{-4}$
				15.0	+	2.5 2.0	$16.1 \cdot 10^{-4}$

Примечания. 1. Знак «+» в графе 6 означает наличие зажигания, знак «–» — отсутствие. 2. В графе 7 указан либо промежуток времени до зажигания, либо число опытов, в которых зажигание не было достигнуто.

от удара и трения не коррелирует со стандартной температурой самовоспламенения, которая среди изученных веществ наименьшая для паров бензина (отсутствие зажигания фрикционными искрами) и наибольшая для водорода (наибольшая частота зажигания) [14]. Этот результат совпадает с выводами работы [8].

В табл. 2 и на рис. 3, 4 представлены вычисленные по формуле (2) частоты зажигания изученных парогазовых смесей искрами от удара и трения. Для случаев, когда зажигание не наблюдали, были проведены оценки сверху частоты воспламенения в предположении, что значение \bar{t}_3 равно суммарному времени соударений во всех опытах (т. е. в 2 ÷ 5 опытах в зависимости от числа повторений, которое определялось на основе данных, приведенных в графе 7 табл. 2). Если в какой-либо серии опытов имели место случаи зажигания, для них при расчете \bar{t}_3 использовали величину, равную 60 с (т. е. времени одного опыта). Как следует из приведенных выше данных для водорода, максимальная частота зажигания реализуется в бедных смесях с объемным содержанием $[H_2] = 11 \div 12 \%$ (см. рис. 3).

Этот результат совпадает с данными [8, 10]. Как отмечено в работе [9], это обусловлено потреблением кислорода нагретыми твердыми поверхностями. Интересными представляются экспериментальные данные для ацетилена, которые свидетельствуют о повышении зажигательной способности при обогащении горючей смеси ацетиленом вплоть до богатых смесей (при $[C_2H_2] = 10 \div 12 \%$) (рис. 4). Данные особенности обусловлены, вероятно, склонностью ацетиленовых пламен к сажеобразованию и химической кинетикой этого процесса, существенно отличающейся от химической кинетики горения остальных углеводородов.

Влияние вида конструкционного материала на вероятность зажигания фрикционными искрами легче всего проследить на примере полученных нами экспериментальных данных для водорода (см. табл. 2). Обращает на себя внимание тот факт, что зажигание водородовоздушных смесей не происходит, если один из материалов обладает более высокой теплопроводностью по сравнению со сталью (алюминий, латунь). Действительно, в этом случае тепловая энергия, выделяющаяся при ударе и трении, диссипирует по объему образца достаточно быстро и не удается достичь температуры поверхности, необходимой для зажи-

гания водородовоздушной смеси. Однако при этом неясным остается отсутствие зажигания, когда одним из материалов является нержавеющей сталь. Данный вопрос требует дополнительных исследований.

Как отмечено выше, зажигающая способность искр от удара и трения не коррелирует со стандартной температурой самовоспламенения газов и паров, образующих горючую парогазовую смесь. Так, водород, отличающийся наиболее высокой температурой самовоспламенения среди изученных веществ (510 °C [14]), имеет наибольшую частоту зажигания. В то же время водород характеризуется существенно более низкой минимальной энергией зажигания (0.017 мДж [14]). При этом зажигание обусловлено нагревом от твердой поверхности, разогретой ударом и трением, и вероятность зажигания определяется возможностью нагрева парогазовой смеси в объеме с характерным размером порядка толщины ламинарного пламени до температуры, близкой к температуре пламени. Качественно аналогичный эффект наблюдается при зажигании газовых смесей электрическим разрядом [13]. Поэтому можно предположить наличие корреляции между зажигающей способностью фрикционных искр и минимальной энергией зажигания горючих газов и паров.

Из проведенных исследований следует вывод, что говорить об искробезопасности того или иного конструкционного материала можно лишь с указанием того, с каким другим материалом происходит соударение или трение и по отношению к какой парогазовой смеси оценивается искробезопасность. При этом минимальная энергия зажигания газов и паров может быть использована как сравнительный параметр. Так, если пара конструкционных материалов искробезопасна по отношению к парогазовой смеси с данной минимальной энергией зажигания, то она будет искробезопасна и для других парогазовых смесей с более высокими минимальными энергиями зажигания.

Другим важным вопросом является определение частоты зажигания, начиная с которой конструкционные материалы перестают быть искробезопасными. В работе [6] в качестве таковой принято значение 10^{-5} . Результаты настоящей работы подтверждают обоснованность такого выбора. При этом возникает вопрос: если определенное по методике настоящей работы значение частоты зажигания

не превышает 10^{-5} , являются ли испытанные конструкционные материалы искробезопасными абсолютно во всех случаях? Ясно, что параметры установки ограничены в плане выделяющейся при соударении энергии, на практике могут возникнуть более высокие энергии соударения и материалы, признанные по изложенной методике искробезопасными, могут в каких-то гипотетических случаях привести к зажиганию парогазовых смесей. Этот факт надо иметь в виду при практическом использовании результатов испытаний по предложенной методике. Следует отметить, что вряд ли может быть предложена какая-либо методика испытаний конструкционных материалов на искробезопасность, которая не обладала бы приведенным выше недостатком.

ВЫВОДЫ

В настоящей работе изложена методика испытаний конструкционных материалов на искробезопасность и приведены результаты ее апробации на примере нескольких пар материалов и образцов горючих газов и паров. При ударе и трении удалось зажечь водородовоздушные и ацетиленовоздушные смеси, в то время как смеси метана, паров бензина АИ-92 и сжиженного углеводородного газа с воздухом оказались невоспламеняемыми. Наиболее воспламеняемыми были бедные смеси водорода с воздухом при объемной концентрации $[H_2] = 11 \div 12 \%$. Сделан вывод о том, что искробезопасность следует оценивать применительно к заданной паре конструкционных материалов и составу парогазовой смеси, т. е. этот показатель не является универсальным.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Правила** противопожарного режима в Российской Федерации. Утверждены Постановлением Правительства Российской Федерации № 390 от 25.04.2012.
2. **Инструкция** по наливу, сливу и перевозке сжиженных углеводородных газов в железнодорожных вагонах-цистернах. — М.: Недра, 1980.
3. **Технические** требования на запорно-пломбировочные устройства механические для железнодорожных цистерн и вагонов. — М.: МПС, 1998.
4. **Таубкин С. И.** Пожар и взрыв, особенности их экспертизы. — М.: ВНИИПО, 1998.
5. **ГОСТ Р 91330.0-99***. Электрооборудование взрывозащищенное. Общие требования (Приложение Е. Испытания материалов на фрикционную искробезопасность).
6. **Методика** оценки искробезопасности материалов. — М.: ВНИИПО, 2000.
7. **Шебеко Ю. Н., Навценя В. Ю., Костюхин А. К. и др.** Методы исследования искробезопасности материалов // Пожаровзрывобезопасность. — 2000. — Т. 9, № 1. — С. 18–27.
8. **Proust C., Hawksworth S., Rogers R., Beyer M., Lakic D., Raveau D., Herve P., Pin V., Petitfrere C., Lefebvre X.** Development of a method for predicting the ignition of explosive atmospheres by mechanical friction and impacts (MECHEX) // J. Loss Prevent. Process Ind. — 2007. — V. 20. — P. 349–369.
9. **Komai T., Uchida S., Umezumi M.** Ignition of methane — air mixtures by frictional sparks from light alloys // Saf. Sci. — 1994. — V. 17, N 1. — P. 91–102.
10. **Powell F.** Ignition of flammable gases and vapors by friction between footwear and flooring materials // J. Hazard. Mater. — 1977. — V. 2. — P. 309–319.
11. **Schulz F., Dittmar P.** Experimentelle untersuchungen uber die zundfahigkeit von schlagfunken gegenuber explosiblen gasfornigen gemischen // Arbeitsschutz. — 1963. — V. 10. — P. 259.
12. **Способ** испытания на фрикционную безопасность образцов из легких сплавов: пат. РФ 2049332 от 27.11.1995 / С. А. Ихно, Г. С. Белоконов.
13. **Зельдович Я. Б., Воеводский В. В.** Тепловой взрыв и распространение пламени в газах. — М.: Моск. механический ин-т, 1947.
14. **Пожарная** опасность веществ и материалов и средства их тушения: справочник / под ред. А. Н. Баратова, А. Я. Корольченко. — М.: Химия, 1990. — Т. 1, 2.

Поступила в редакцию 16/VIII 2017 г.