

архив
П. А. ФЕТИСОВ

**ВЗРЫВООПАСНОСТЬ
ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ИСКРЕНИЯ
В ГАЗОВЫХ СМЕСЯХ**

**ИЗДАТЕЛЬСТВО
МИНИСТЕРСТВА КОММУНАЛЬНОГО ХОЗЯЙСТВА РСФСР**

Москва — 1959

Инж. П. А. ФЕТИСОВ

П. 1. 38
Ф. 45

ВЗРЫВООПАСНОСТЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ИСКРЕНИЯ В ГАЗОВЫХ СМЕСЯХ

40073



ИЗДАТЕЛЬСТВО
МИНИСТЕРСТВА КОММУНАЛЬНОГО ХОЗЯЙСТВА РСФСР

Москва — 1959

W

В брошюре излагаются материалы по результатам исследований взрывоопасности электрического искрения в различных газо-паровоздушных взрывчатых смесях.

Описаны экспериментальная установка для исследований искрового зажигания указанных смесей и различные механизмы искрения. Приведены методика исследований, а также составы смесей, наиболее легко воспламеняемые от электрической искры. Дан новый метод ускоренной оценки искробезопасности в различных газо-паровоздушных смесях.

Брошюра рассчитана на работников пожарной охраны, а также на инженерно-технический персонал промышленных предприятий, проектных организаций и конструкторских бюро, занимающихся исследованием, конструированием и эксплуатацией искробезопасной электроаппаратуры.

ВВЕДЕНИЕ

Электрическая энергия широко применяется во всех областях народного хозяйства. Однако в производствах, отличающихся от обычных наличием взрывоопасной среды, применение электрического оборудования связано с опасностью воспламенения этой среды в случае его нормального или аварийного искрения.

В связи с этим Правилами устройства электрических установок (до их переиздания в 1957 г.) во взрывоопасных надземных помещениях запрещалось применять любое электрооборудование (включая и слаботочное) в открытом, невзрывозащищенном, исполнении. Эти Правила не разрешали также применять в таких помещениях искробезопасное электрооборудование.

В результате исследований, проведенных в Макеевском научно-исследовательском институте (МАКНИИ), в Институте горного дела Академии наук СССР (ИГД АН), Донецком горном институте (ДОНУГИ), было установлено, что не всякая электрическая искра способна воспламенить метано-воздушную взрывчатую смесь.

Оказалось, что при определенных значениях параметров электрической цепи (ток, индуктивность, емкость, напряжение) искрение электрооборудования при нормальной его работе или в случае неисправности не способно воспламенить взрывчатую смесь. Такой вид электрооборудования получил название искробезопасного.

Искробезопасное электрооборудование по сравнению с оборудованием, выполненным в любом другом взрывозащищенном исполнении, значительно проще по изготовлению, дешевле, имеет меньший вес и проще в эксплуатации. Поэтому такое электрооборудование нашло широкое применение в угольной промышленности Советского Союза и за рубежом.

Перспективность применения искробезопасного электрооборудования очевидна не только для предприятий угольной промышленности, но и для производств других отраслей народного хозяйства. К таким производствам в первую очередь следует отнести предприятия химической, нефтяной, нефтеперерабаты-

вающей, газодобывающей, лакокрасочной промышленности и другие, где применение электрооборудования в открытом, незащищенном, исполнении связано с опасностью воспламенения окружающей взрывоопасной среды.

Особое практическое значение приобретает применение искробезопасного электрооборудования в связи с постановлением майского Пленума ЦК КПСС (1958 г.) и решением XXI съезда партии «Об ускоренном развитии химической промышленности и особенно производства синтетических материалов и изделий из них», а также по вопросу о дальнейшем развитии механизации и автоматизации производственных процессов.

В этих исторических документах поставлены задачи широкого внедрения новой техники и развития автоматизации различных технологических процессов, особенно связанных с агрессивными, токсичными и взрывоопасными средами.

Отсутствие данных как в отечественной, так и в зарубежной практике по искробезопасным параметрам для различных взрывчатых сред до последнего времени не позволяло применить искробезопасное электрооборудование в указанных производствах.

В то же время настоятельная потребность в нем подтверждается многочисленными запросами из различных организаций в органы пожарной охраны о разрешении применения того или иного электрооборудования в какой-либо взрывоопасной среде.

Однако без проведения соответствующих работ разрешение этого вопроса не представлялось возможным. Поэтому, начиная с 1953 г., в ЦНИИПО были начаты исследования в смесях, отличных от метано-воздушных. Кроме того, были испытаны на искробезопасность некоторые образцы электрических слаботочных приборов и устройств, присланные в институт из различных организаций.

В результате исследований в ЦНИИПО получены искробезопасные параметры более чем для десяти смесей. Благодаря этому Правила устройства электроустановок (изд. 1957 г.) были дополнены новыми данными.

ГЛАВА I

КРАТКИЙ ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

Еще в 80-х годах прошлого столетия в разных отраслях промышленности начали применять электрическое освещение в виде ламп накаливания.

При введении электрического освещения в угольных шахтах столкнулись с вопросом взрывоопасности электроламп. Необходимо было выяснить: воспламеняет ли накаливаемая нить лампы рудничный газ и каковы те условия, при которых не происходит воспламенения газа?

Исследователи стали работать над разрешением проблемы взрывобезопасного электрического освещения.

П. П. Пироцкий в своей книге [1] приводит результаты исследований, полученные различными авторами.

Было установлено, что при применении раскаленных проводочек взрывчатая смесь воспламеняется тем легче, чем толще проводочка и чем выше (по мнению исследователей) температура плавления металла, из которого она сделана.

Применялись проволоки из разных металлов (железо, алюминий, медь, латунь, серебро, платина), различной длины и диаметров, а также угольные нити для ламп накаливания. Исследования проводились во взрывчатой смеси, содержащей 8,5% метана в воздухе. Источником энергии служила городская сеть постоянного тока напряжением 110 в.

Более 2000 опытов показали, что воспламенение происходит только тогда, когда нить расплавится и образуется искра [1]. Несмотря на то, что накаливаемые проводники имели температуру больше 1000°C , а для воспламенения рудничного газа достаточно температура около 600°C , авторы этих испытаний (Курье, Менье) категорически утверждали, что воспламенение газовой смеси проводниками, накаливаемыми электрическим током, не возможно без помощи искры, возникающей при размыкании цепи.

П. П. Пироцкий приводит результаты опытов другого исследователя Лемэри (1911 г.), отрицавшего обязательное наличие искрения для воспламенения газовой смеси. Так, например,

Лемэри было установлено, что для воспламенения рудничного газа угольной нитью лампы накаливания необходима температура 2050°C . Измеренные пирометром температуры угольных нитей испытанных ламп составляли $1940\text{--}2690^{\circ}\text{C}$. Одна из угольных нитей вызвала 42 воспламенения рудничного газа и не сгорела сама. Металлические нити ламп накаливания (платина, циркон, вольфрам) имели температуру $1970\text{--}2835^{\circ}\text{C}$, причем одна нить дала 14 последовательных воспламенений рудничного газа и только после этого перегорела.

Так была установлена возможность воспламенения рудничного газа от накаливаемых нитей электроламп. В связи с этим техника встала на путь создания взрывобезопасной арматуры. Обыкновенные лампы накаливания стали помещать во взрывонепроницаемую оболочку.

И только совсем недавно советский инженер В. Б. Митник (ВУГИ) [12] доказал возможность создания взрывобезопасной лампы накаливания мощностью до 15 *вт* без защитной оболочки. Лампа оказалась взрывобезопасной благодаря применению ионного размыкателя, расположенного в колбе лампы, заполненной неоне-аргоно-гелиевой смесью при давлении 60 *мм* рт. ст.

Если разрушить колбу лампы, то воздух, проникший внутрь нее, мгновенно прекращает газовый разряд между электродами ионного размыкателя, тем самым автоматически выключается питание нити накаливания от источника тока.

Наряду с изучением условий воспламенения смесей метана с воздухом от нагретых проводников не меньший, если не больший, практический интерес представляет вопрос воспламенения таких смесей от электрической искры.

Еще Деви обнаружил, что слабая электрическая искра, обладающая небольшой энергией для зажигания, способна воспламенять только такие смеси метана с воздухом, составные части которых находятся в определенной пропорции [1].

Другим исследователем было установлено, что при содержании метана в воздухе в количестве от 7 до 9% по объему такая смесь легко воспламеняется от слабой электрической искры.

Впоследствии выяснилось [1], что наиболее легко воспламеняемой метано-воздушной смесью является смесь, содержащая метан в количестве 8,5% по объему.

При изменении процента содержания метана в воздухе в сторону уменьшения (5%) или увеличения (16%) воспламенение смеси происходит редко.

Однако мощные искры, получаемые, например, при разряде конденсатора, воспламеняют метано-воздушные смеси, лежащие в более широких пределах, чем 7—9%.

На воспламеняющую способность электрической искры влияет много факторов. Уилер, например, подразделил их на факторы механического и электрического порядка [1].

К факторам механического порядка он отнес:

- 1) материал контактов;
- 2) величину поверхности контактов в момент их размыкания;

- 3) скорость размыкания искрящих контактов.

К электрическим факторам:

- 1) величину индуктивности цепи;
- 2) величину напряжения;
- 3) величину тока в момент размыкания цепи.

Влияние материала контактов Уилер обосновывает полученными им результатами исследований, которые приведены в табл. 1 и 2. Опыты проводились в метано-воздушной среде при размыкании цепи с индуктивностью 0,03175 гн и напряжением 120 в. Токи, при которых происходило воспламенение, были различными, в зависимости от материала контактов. Уилер сделал вывод, что воспламеняющие токи тем меньше, чем ниже температура кипения металла, из которого сделаны контакты.

Т а б л и ц а 1

Металл	Температура кипения металла в °С	Ток зажигания для 8,5% смеси метана с воздухом в а
Кадмий	778	0,23
Цинк	918	0,25
Алюминий	1800	0,30
Серебро	1955	0,32
Золото	2530	0,34
Медь	2310	0,38
Никель	2330	0,39
Железо	2450	0,42
Платина	2450	0,48

Д. Морган [2] также отмечает влияние материалов контактов, доказывая это тем, что «спектр индуктивной искры главным образом характеризуется линиями металла контактов».

Р. М. Лейбов, руководствуясь полученными Уилером данными, считает, что интенсивность искры в значительной степени зависит от наличия металлических паров в искровом промежутке. В связи с этим, по мнению Лейбова, имеется определенная зависимость между минимальной величиной воспламеняющего тока и температурой парообразования металла искрящих контактов.

Влияние различных металлов на воспламеняющую способность, как указывает Р. М. Лейбов, выявилось также в опытах Кука и Гриса, проведенных ими при напряжении постоянного тока 25 в в цепи с индуктивностью 0,36 гн (табл. 2).

Т а б л и ц а 2

Металл	Воспламеняющий ток в а
Платина	0,41
Медь	0,40
Цинк	0,28

П. П. Пироцкий считает, что чем меньше площадь контактов в момент возникновения искры между ними, тем легче масса металла превращается в пар, который, по его мнению, поддерживает проводимость дуги.

Кроме того, с уменьшением площади контактов уменьшается объем искрового промежутка, в котором сосредотачивается

определенное количество тепла. С этим связано повышение температуры, что в свою очередь облегчает воспламенение смеси.

Следовательно, опасность искрообразования в практических установках тем больше, чем тоньше токопроводящие провода, так как при разрыве тонких проводов при сохранении всех прочих условий одинаковыми воспламеняющий ток уменьшается [1].

В. С. Кравченко [8] считает неправильным связывать влияние материала контактов на величину воспламеняющего тока с температурой па-

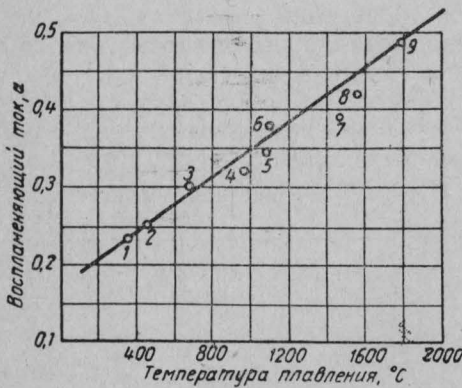


Рис. 1. График зависимости величины воспламеняющего тока от температуры плавления металла контактов:

- | | |
|-------------------------|-------------------------|
| 1. Кадмий — 321° С. | 6. Медь — 1083° С. |
| 2. Цинк — 420° С. | 7. Никель — 1455° С. |
| 3. Алюминий — 660,5° С. | 8. Железо — 1535° С. |
| 4. Серебро — 960,5° С. | 9. Платина — 1773,5° С. |
| 5. Золото — 1063,4° С. | |

рообразования данного металла. Приведенный им график (рис. 1) наглядно подтверждает линейную зависимость величины воспламеняющего тока от температуры плавления металла.

Факторами механического порядка, влияющими на воспламеняющую способность искры размыкания, как отмечает Д. Морган [2], являются площадь контактов в момент размыкания цепи электрического тока и скорость этого размыкания. Чем меньше площадь соприкосновения контактов в момент их размыкания, тем в меньшем объеме концентрируется энергия дуги, а следовательно, тем больше сосредоточивается в ней тепла, необходимого для воспламенения смеси.

Кроме того, большая площадь контактов способствует быстрому охлаждению электрической дуги, образуемой при размыкании контактов, что приводит к уменьшению ее воспламеняющей способности.

Говоря о значении скорости размыкания контактов, не подразделяя при этом электрические цепи по величине индуктивного сопротивления, Д. Морган считает, что «очень медленное и очень быстрое размыкание тока приводит к увеличению потребной энергии зажигания». По его мнению, «имеется определенная оптимальная скорость размыкания, при которой потребная энергия воспламенения является наименьшей».

Исследованиями других авторов [1, 8, 14] было установлено, что скорость размыкания контактов в зависимости от индуктивности цепи по-разному влияет на величину тока, при которой происходит воспламенение.

В индуктивных цепях с увеличением скорости размыкания воспламенение смеси происходит при меньшей величине тока. Наоборот, в цепях практически безындуктивных (0,001 гн и меньше) уменьшение воспламеняющих токов обнаружено при медленном размыкании контактов.

На воспламеняющую способность смеси от электрической искры оказывают влияние индуктивность цепи и напряжение источника тока. Увеличение индуктивности электрической цепи уменьшает величину воспламеняющего тока [1, 8, 10, 14], т. е. увеличивает взрывоопасность электрооборудования.

Эти же исследователи установили, что с увеличением напряжения источника тока величина воспламеняющего тока резко снижается (при размыкании безреактивных цепей). При размыкании индуктивных цепей увеличение напряжения не вызывает заметного изменения величины воспламеняющего тока. Чем больше индуктивность цепи, тем меньше сказывается увеличение напряжения источника тока.

Исследования других, отличных от метана смесей [14, 15] также подтвердили влияние индуктивности на величину воспламеняющего тока. Более поздними работами [18] было установлено, что изменение величины тока находится в степенной зависимости от изменения индуктивности (в пределах исследованных величин от 0,0001 до 0,65 гн). Подробнее об этом будет сказано ниже.

Увеличение напряжения источника питания значительно уменьшает величину воспламеняющего тока лишь при небольших величинах индуктивности цепи порядка 0,001 гн и меньше. При большей величине индуктивности увеличение напряжения незначительно снижает величину воспламеняющего тока.

На воспламеняющую способность искрения влияет также частота тока. В целях выяснения этого влияния Торнтон в свое время провел большие экспериментальные исследования. Им было установлено, что чем выше частота тока, тем труднее

при прочих равных условиях воспламенить метано-воздушную смесь искрой размыкания.

Он даже считал возможным на основе этого сконструировать искробезопасный выключатель для силовых установок в шахтах при условии применения тока повышенной частоты 150 гц [1]. Уилер также ставил опыты как при постоянном, так и при переменном токах разной частоты и при различных напряжениях. Он сделал вывод: «Род тока, будь то постоянный или переменный, существенно не влияет на воспламеняющую способность искр размыкания. Воспламенение посредством переменного тока только более трудно в том смысле, что образование искры при максимальном (амплитудном) значении тока было делом удачи, случая» [1].

Для проверки утверждений Торнтона и Уилера в отношении воспламеняющей способности постоянного и переменного токов советские исследователи—Н. И. Бражник и К. А. Скрынников—в 1933 г. также провели соответствующие исследования. Эта работа имела большое практическое значение для решения вопроса безопасной эксплуатации электрических устройств в шахтах, в воздухе которых присутствуют газ и пыль [16].

Опыты проводились во взрывчатой смеси, содержащей 9,5% метана в воздухе. Искрение в этой смеси обеспечивалось размыканием электрической цепи, питаемой в одном случае постоянным током напряжением 135 в, а в другом—переменным током частотой 50 период/сек. при напряжении 125 в (эффективных).

При сравнении полученных данных было установлено, что воспламеняющая способность постоянного и переменного токов одинакова, если амплитудное значение переменного тока в момент размыкания цепи равно по величине значению постоянного тока.

Рассматривая вопрос о влиянии частоты тока на воспламеняющую способность, В. С. Кравченко на основании полученных им результатов исследований электронискового зажигания пришел к следующему заключению [9].

Основным фактором, определяющим воспламеняющую способность электрических искр, является энергия разряда.

Влияние частоты тока сказывается, главным образом, на изменении продолжительности горения электрической дуги при размыкании цепи, а следовательно, и на изменении энергии разряда.

Продолжительность искрения при размыкании переменного тока меньше, чем при размыкании постоянного тока того же значения, так как процесс перехода напряжения переменного тока через нуль способствует прекращению дуги. Этим и объясняется полученное на практике увеличение минимального значения воспламеняющего тока и, следовательно, пониже-

ние воспламеняющей способности искрения с увеличением частоты.

Так как продолжительность искрения при постоянном и переменном токах промышленной частоты почти одинакова (если размыкаются слабые токи равного значения), а продолжительность искрения при частоте тока 1000 гц несколько меньше, чем при постоянном токе, поэтому и воспламеняющие токи при повышенной частоте несколько выше, чем при постоянном токе.

Таким образом, воспламеняющая способность переменного тока промышленной частоты (50 гц) признается одинаковой с воспламеняющей способностью постоянного тока, если сравниваются амплитудные значения переменного тока и напряжения с постоянным током и напряжением. Воспламеняющие токи при повышенной частоте переменного тока больше, чем при постоянном токе.

В. С. Кравченко отмечает, что вероятность (повторяемость) воспламенения при переменном токе тем меньше, чем выше частота. Так, например, по данным П. Ф. Ковалева [10], из трех размыканий цепи переменного тока (50 гц) в среднем только одно приходится на максимум тока. Отсюда вероятность воспламенения при переменном токе (50 гц) должна быть в три раза меньше, чем при постоянном токе.

На этом основании В. С. Кравченко пришел к выводу, что «при переменном токе не только уменьшается вероятность воспламенения от искр размыкания, но и снижается воспламеняющая способность этих искр, причем эффект снижения тем выше, чем выше частота тока.

Для звуковых частот (1000 гц и выше) воспламеняющая способность уменьшается примерно в два раза, а для ультразвуковой частоты (100 000 гц) — приблизительно в 10 раз по сравнению с постоянным током для случая безреактивных цепей» [9].

ГЛАВА II

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Явление воспламенения газо-паровоздушных взрывоопасных смесей от электрической искры представляет собой сложный физико-химический процесс.

На воспламеняющую способность электрического разряда, как отмечалось раньше, влияет много факторов, в том числе: величина размыкаемого тока при искрении, индуктивность или емкость цепи, напряжение источника тока. Существенное влияние на воспламеняющую способность оказывают также форма, материал, чистота поверхностей контактов, между которыми происходит искрение, скорость размыкания контактов, давление, температура окружающей среды, влажность газо-

вой смеси и т. д. Из-за обилия этих факторов процесс зажигания смеси электрической искрой имеет неустойчивый характер.

Существует несколько теорий механизма воспламенения таких смесей, которыми объясняется качественная сторона этого явления.

Однако для практического решения вопроса о воспламеняющей способности электрического искрения доступнее выявить экспериментальным путем количественную сторону этого явления.

При этом оказывается вполне достаточным определить воспламеняемость смеси электрической искрой (при определенных параметрах цепи: ток, индуктивность, напряжение) по вероятности (частоте) этого воспламенения.

В основу методики положен статический метод оценки искробезопасности, предложенный В. С. Кравченко при проведении им исследований в метано-воздушных смесях. Впоследствии этот метод был математически усовершенствован Л. Н. Большевым в Математическом институте им. Стеклова АН СССР.

Сущность метода заключается в следующем: обозначим через I ток, текущий по цепи до ее размыкания; m — число воспламенений (взрывов) смеси в камере; n — общее количество произведенных искрений в камере до получения необходимого количества воспламенений m смеси.

Согласно общей статистической теории обработки результатов экспериментов, оценка частоты событий или статистическая вероятность воспламенения может быть выражена

$$P' = \frac{m-1}{n-1}.$$

По теории вероятности, эта оценка лишена систематической ошибки в противоположность часто употребляющейся оценке $P' = \frac{m}{n}$, имеющей такую ошибку.

Статистическая вероятность воспламенения P' может отклоняться от истинной математической вероятности P на величину ϵ , т. е.

$$P = P' \pm \epsilon.$$

Известно, что чем больше проведено положительных опытов m (взрывов смеси), тем скорее может быть получено равенство между статической и математической вероятностями.

Однако выполнение очень большого числа опытов связано с техническими трудностями.

Количество опытов, необходимое для получения достаточной точности экспериментов, было определено построением специальных графиков $P=f(m)$ (рис. 2). По экспериментально полученным для нескольких газов данным, изменения стати-

стической вероятности воспламенения находятся в зависимости от количества произведенных взрывов смеси в камере.

Признаком достижения необходимой точности, т. е. приближения статистической вероятности воспламенения к математической, является получение прямолинейности кривой $P=f(m)$.

Постоянство числа m обеспечивало во всех сериях опытов примерно одинаковые относительные отклонения статистической вероятности (частоты) от математической.

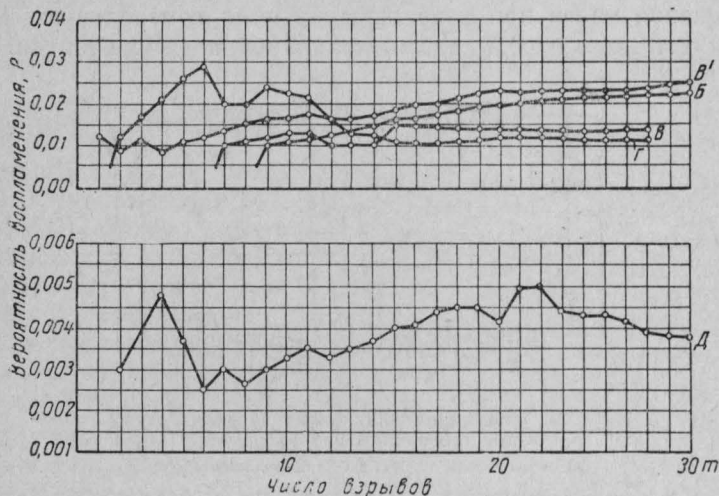


Рис. 2. Зависимость статистической вероятности воспламенения газозводушных смесей от числа набранных взрывов m смеси:

B — пропан 6%; 24 в; 0,22 гн; 0,09 а (контакты из вольфрама и стали); B' — ацетон 7%; 24 в; 0,22 гн; 0,085 а (контакты из вольфрама и стали); G — этилен 7%; 24 в; 0,22 гн; 0,07 а (контакты — те же); D — водород 20%; 60 в; 0,022 гн; 0,095 а (контакты из облуженной латуни).

В наших опытах было принято число $m=30$, а число искрений n определялось по счетчику.

Порядок проведения экспериментов по данной методике следующий:

1. Собирается испытуемая электрическая цепь с определенной величиной омического и индуктивного сопротивления (R и L) и напряжения источника питания (U). Параллельно испытуемой схеме собирается контрольная схема с несколько увеличенным током размыкания (искрения) (рис. 3).

2. Во взрывной камере по методу парциального давления создается исследуемая взрывчатая смесь, по составу наиболее легко воспламеняемая от электрической искры. Если состав смеси (количество газа или паров горючего в воздухе в проценте по объему), при котором смесь является наиболее лег-

ко воспламеняемой от искры, неизвестен, то производится предварительное определение этого состава. Методика такого определения будет изложена ниже.

Величина тока искрения в исследуемой электрической цепи устанавливается из такого расчета, чтобы при его размыкании (искрении) воспламенение смеси происходило не сразу, с первой искры, а после нескольких искрений, например 10—20.

В случае, когда воспламенение смеси при искрении между контактами K на испытуемой схеме не происходит, искрящие контакты переключают на контрольную схему. Отсутствие воспламенения смеси при переключении и на контрольную схему указывает на плохое качество созданной в камере смеси.

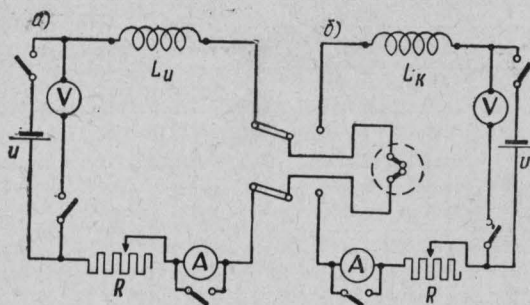


Рис. 3. Принципиальная электрическая схема для проведения исследований:
а) испытуемая схема; б) контрольная схема.

После каждого воспламенения (взрыва) смеси по счетчику определяется количество произведенных искрений, вызвавших взрыв.

3. После 5—10 взрывов смеси визуально проверяется качество контактных поверхностей искрящего механизма. При необходимости эти поверхности хорошо зачищают и заостряют.

После установки камеры на место вновь производится заполнение ее взрывчатой смесью необходимой концентрации и создается искрение от схемы с выбранными параметрами до момента, когда произойдет взрыв.

После каждого полученного взрыва смеси камера не менее двух раз продувается чистым воздухом.

Результаты опытов сведены в табл. 3.

4. Не изменяя величины индуктивности и напряжения, но уменьшив величину тока размыкания, проводят вторую серию опытов. Получив при уменьшенном токе I_2 необходимое количество положительных опытов m , равное 30, определяют статистическую вероятность P'_2 . Затем ток еще уменьшается до I_3 и тем же порядком определяется P'_3 . Опыты прекращают для

Таблица 3

№№ опы- тов	Напряже- ние в в	Индук- тивность в гн	Ток раз- мыкания в а	Количество искрений при одном опыте	Результат: + взрыв — нет взрыва	Статисти- ческая ве- роятность
1	24	0,2	0,35	15	+	$P'_1 = \frac{30-1}{580-1}$
2	24	0,2	0,35	100	—	
3	24	0,2	0,35	25	+	
4	24	0,2	0,35	19	+	
5	24	0,2	0,35	22	+	
6	24	0,2	0,35	100	—	

$$\Sigma n = 580; \quad m = 30$$

Примечания: 1. Цифры указаны для примера.

2. Число $m = 30$ соответствует числу положительных опытов.

выбранных величин индуктивности и напряжения, когда в связи с уменьшением тока воспламенение смеси не происходит даже при большом количестве искрений (десяти тысяч в каждом опыте).

По полученным значениям вероятностей P'_1 для I_1 , P'_2 для I_2 , P'_3 для I_3 и т. д. в логарифмической сетке координат строится зависимость вероятности воспламенения при изменении величины размыкаемого тока $P=f(I)$ (рис. 4).

Последующими опытами указанная зависимость определяется для других значений индуктивности, но при той же величине напряжения тока.

5. Получаемая вероятностная закономерность $P'=f(I)$, поскольку она построена в логарифмической системе координат, на ее прямолинейном участке, отвечает уравнению

$$\frac{P'_1}{P'_3} = \left(\frac{I_1}{I_3} \right)^{\text{tg } \alpha}, \quad (1)$$

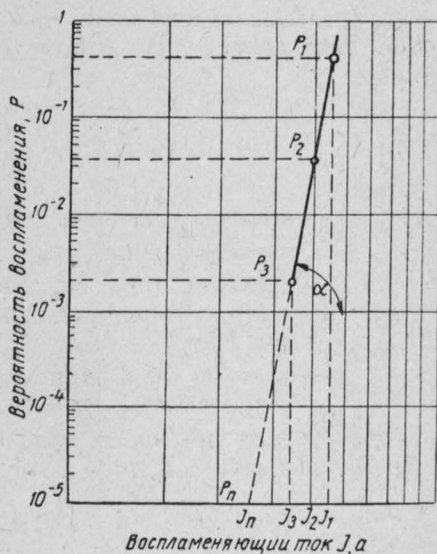


Рис. 4. Зависимость вероятности воспламенения смеси от величины размыкаемого тока (теоретическая).

где $\operatorname{tg} \alpha$ — тангенс угла наклона линии вероятностей зависимости; величина постоянная для данного размыкающего устройства.

Считая, что и при меньших вероятностях воспламенения эта прямолинейность сохранится, можно определить величину тока для другой заданной, близкой к нулю, условной вероятности воспламенения, например 10^{-5} .

Такая вероятность воспламенения названа условной потому, что в действительности при этой вероятности не удастся получить воспламенение смеси даже при выполнении очень большого числа искрений.

Следовательно, при графическом определении тока, соответствующего заданной условной вероятности воспламенения, достаточно продолжить линию вероятности до пересечения ею оси абсцисс, соответствующей заданной условной вероятности воспламенения, например 10^{-5} . Точка пересечения укажет искомого величину тока.

Определение такого тока можно произвести и расчетным путем, используя для этой цели преобразованное уравнение (1)

$$I_n = I_1 \left(\frac{P_n}{P'_1} \right)^{\frac{1}{\kappa}}, \quad (2)$$

где: I_n — искомое значение тока при условной вероятности воспламенения, например $P_n = 10^{-5}$;

I_1 — значение тока, полученное на основании экспериментов при какой-то вероятности воспламенения P'_1 ;

κ — угловой коэффициент или тангенс угла наклона вероятностных кривых.

Подсчет тока возможен также по формуле, выведенной Л. Н. Большевым,

$$I_n = I_1 \left(\frac{P_n n_{\kappa}}{t_{\varepsilon}} \right)^{\frac{1}{\kappa}}, \quad (3)$$

где: P_n — условная вероятность воспламенения, например 10^{-5} ;

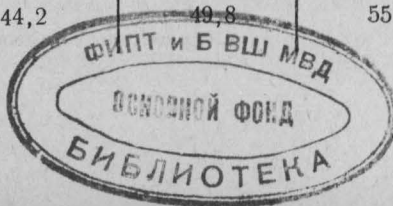
n_{κ} — общее число произведенных в камере искрений при токе I_1 , в результате которых было получено заданное число воспламенений m смеси в камере;

t_{ε} — величина, являющаяся функцией двух переменных m и ε , может быть определена из таблиц, которые обычно приводятся в трудах по теории вероятности.

Таблица 4

<i>m</i>	$\varepsilon = 0,01$	$\varepsilon = 0,001$	$\varepsilon = 0,0001$	$\varepsilon = 0,00001$
	t_ε	t_ε	t_ε	t_ε
2	6,64	9,24	12,0	14,5
3	8,41	11,3	14,0	17,0
4	10,1	13,2	16,0	18,9
5	11,7	14,8	18,0	21,0
6	13,2	16,5	19,9	23,1
7	14,6	18,1	21,7	25,0
8	16,0	19,7	23,4	26,9
9	17,5	21,2	25,0	28,7
10	18,8	22,7	26,3	30,5
11	20,2	24,2	27,8	32,2
12	21,5	25,6	29,4	33,3
13	22,8	27,1	31,0	35,0
14	24,2	28,5	32,5	36,7
15	25,5	29,9	34,0	38,2
16	26,8	31,3	35,5	39,7
17	28,1	32,7	37,0	41,4
18	29,4	34,0	38,5	43,0
19	30,6	35,0	40,0	44,4
20	31,9	36,8	41,4	46,0
21	33,2	38,1	42,8	47,5
22	34,4	39,4	44,3	49,0
23	35,7	40,8	45,6	50,5
24	36,9	42,1	47,0	51,8
25	38,1	43,4	48,4	53,3
26	39,4	44,7	49,8	54,8
27	40,6	46,0	51,2	56,3
28	41,8	47,3	52,6	57,8
29	43,0	48,6	53,9	59,2
30	44,2	49,8	55,3	60,6

40073



Значение t_{ε} определяется в зависимости от принятого количества положительных опытов m .

Например, при отклонении $\varepsilon = 0,0001$ (отклонение статистической вероятности от истинной математической) значения m и t_{ε} согласно этой таблице, составляют:

m	5	10	15	20	25	30
t_{ε}	18,0	26,3	34	41,4	48,4	55,3

Следовательно, при найденном значении тока I_1 остальные данные известны, поэтому определение искомого тока I_n не представляет затруднений.

6. По значениям токов, полученным из графиков $P=f(I)$ или расчетным путем по вышеприведенным формулам для исследованных индуктивностей, в логарифмической сетке координат строят характеристики искробезопасности $I=f(L)$ при $U=\text{const}$.

В целях облегчения сопоставления получаемых результатов все характеристики искробезопасности строятся при одной условной вероятности воспламенения (например, 10^{-5}).

ГЛАВА III ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

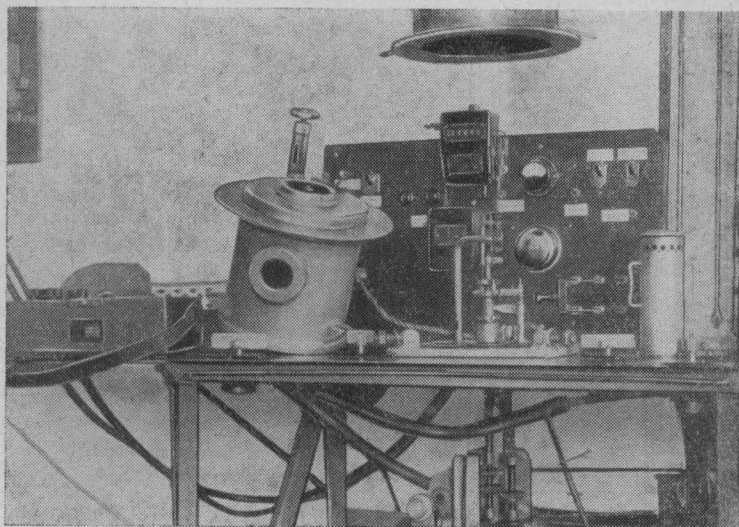


Рис. 5. Общий вид экспериментальной установки.

Созданная в Центральном научно-исследовательском институте противопожарной обороны (ЦНИИПО) экспериментальная установка позволяет проводить исследования зажигания электрической искрой не только газовоздушных, но и паровоздушных смесей, а также пылевых смесей с воздухом.

Такое исполнение установки отличает ее от известных установок, на которых проведение исследований зажигания смесей электрической искрой возможно только либо в газовоздушной (МАКНИИ, ИГД АН), либо только в паровоздушной смеси (ВНИИТБ).

Установка ЦНИИПО представляет собой стенд с двумя боковыми откидными крышками для размещения элементов электрической схемы и измерительной аппаратуры и щита управления, являющегося задней стенкой стенда (рис. 5).

1. ВЗРЫВНАЯ КАМЕРА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ГАЗО-ПАРОВОЗДУШНЫХ СМЕСЕЙ

На рис. 6 представлены схема устройства взрывной камеры испытательной установки и относящиеся к ней приспособления.

Комплект установки имеет корпус камеры 1, выполненный из листового металла толщиной 8 мм. Нижней открытой стороной перед опытом он закрепляется на металлической плите болтами.

В камере помещается механизм 2 с искрящими контактами, причем для наблюдения за его работой в корпусе камеры имеется смотровое окно 8. Соединение вала механизма искрения с валом привода произведено при помощи изолирующей втулки (на рисунке не показана). На поверхности этой втулки имеется выступ (жулачок), благодаря которому при ее вращении обеспечивается попеременное замыкание контактов электрического счетчика числа оборотов вала механизма, а следовательно, и числа произведенных в камере искрений. Герметичность соединения соприкасающихся и вращающихся деталей обеспечивается резиновой прокладкой между камерой и плитой, а также сальниковым уплотнением 11. В верхней части камеры устанавливаются электронагревательный элемент и предохранительная резиновая пробка 5, которая при взрыве вылетает. Тем самым исключается опасность возникновения больших давлений на внутренние стенки камеры и особенно на стекло смотрового окна. На верхней поверхности камеры установлены игольчатый клапан 4 и глушитель 6, представляющий собой полый цилиндр с набором нескольких пластин с отверстиями. Вверху цилиндр глушителя имеет отверстия для выхода пламени и продуктов сгорания, образующихся при взрыве.

Для отвода продуктов сгорания предусмотрено вентили-

онное устройство, вытяжная труба которого перед началом опытов опускается на верх камеры (см. рис. 5).

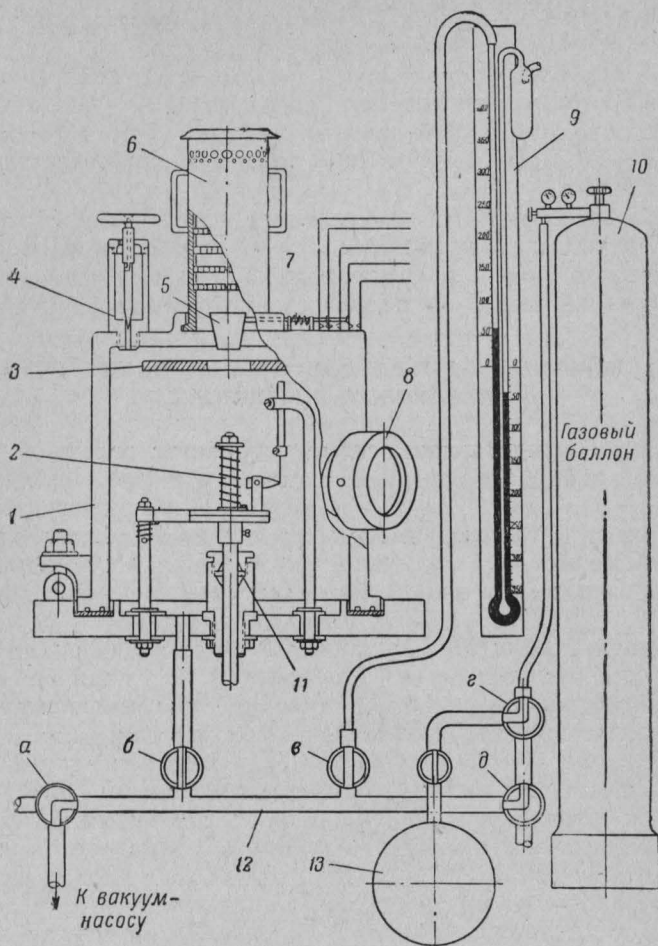


Рис. 6. Схема (разрез) взрывной камеры:

1 — корпус камеры; 2 — механизм искрения; 3 — электрический нагреватель; 4 — дозирующий игольчатый клапан; 5 — предохранительный клапан с глушителем; 6 — блокировочные контакты; 7 — смотровое окно; 8 — ртутный манометр; 9 — газовый баллон; 10 — сальниковое уплотнение; 11 — трубопровод; 12 — промежуточная камера для газа.

Действие блокировочного устройства 7 (см. рис. 6) заключается в следующем. Во время взрыва смеси в камере предохранительная пробка, вылетая, освобождает упорный стержень блокировочных контактов. При этом одна пара этих контактов через промежуточное реле останавливает вращение механизма

искрения, другая пара автоматически включает электродвигатель вытяжной вентиляции, а третья прекращает работу счетчика.

При проведении исследований очень важно, чтобы во взрывной камере была одинаковая, заранее заданная концентрация паров горючей жидкости или газа в смеси с воздухом. Этого можно достигнуть лишь при наличии хорошей герметичности всех соединений как в самом трубопроводе, так и во взрывной камере. В противном случае при введении в камеру газа или жидкости возможно проникновение воздуха, так как раз-

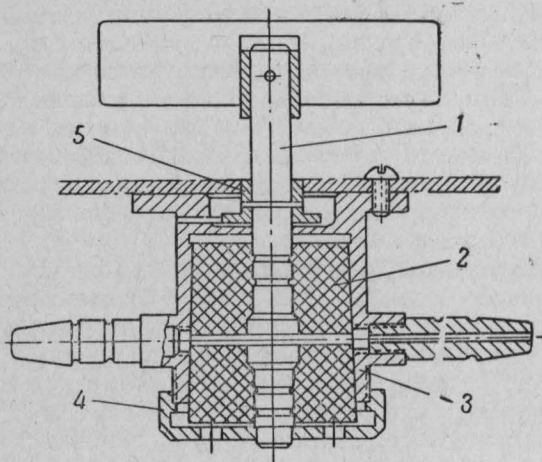


Рис. 7. Кран специальной конструкции:

1 — стальной стержень; 2 — резиновая пробка; 3 — корпус; 4 — накидная гайка; 5 — ограничитель поворота.

режение создается значительное, порядка 740—750 мм рт. ст. При плохой герметичности количество вводимых паров горючей жидкости или газа в действительности может оказаться меньшим по сравнению с расчетным.

Для лучшей герметичности соединений трубопровода их собирают на быстросохнущих лаках или красках. Применение обычных пробковых кранов оказывается неэффективным; разрежение, создаваемое в камере, нарушается при этих кранах очень быстро. В связи с этим в нашей установке были применены краны особой конструкции (рис. 7), предложенной Н. И. Мантуровым.

Для создания в камере паровоздушной смеси предусмотрен дозирующий игольчатый клапан 4 (см. рис. 6), конструкция которого позволяет вводить в разреженное пространство камеры горючую жидкость именно в том количестве, какое необходимо для заданного состава смеси. Введение жидкости

производится через очень узкую кольцевую щель, образуемую между конусом иглы и отверстием клапана.

Для создания газовой воздушной взрывчатой смеси газ вводится в камеру из промежуточного баллона 13 (см. рис. 6), предварительно заполненного исследуемым газом через редуктор из основного баллона. Перед тем как впустить в камеру горючую жидкость или газ, из внутреннего пространства взрывной камеры вакуум-насосом откачивается воздух.

Создание взрывчатой паровой воздушной смеси в камере производится в следующем порядке. Краны б и в (см. рис. 6) открываются для сообщения основного трубопровода с камерой и ртутным манометром. Краны а и д устанавливаются в положение, при котором трубопровод отключается от атмосферы. Кран г соединяет трубопровод газового баллона с промежуточной камерой. При этом выпускной клапан газового баллона и его редуктор закрываются.

После включения в работу вакуум-насоса в камере создается разрежение воздуха, величина которого контролируется по ртутному манометру. Степень разрежения (вакуум) доводится до максимально возможного (740—750 мм рт. ст.). Затем краном а вакуум-насос отключается от трубопровода. При открытии игольчатого крана 4 в камеру впускается горючая жидкость, которая, попадая в разреженное пространство камеры и испаряясь, снижает разрежение. По величине этого снижения, контролируемого по ртутному манометру, определяется необходимое количество вводимого в камеру газа или паров жидкостей. После этого, открыв кран д, понижают давление в камере до атмосферного, затем после перекрытия крана б в камере производится искрение.

После каждого взрыва камера продувается чистым воздухом не менее двух раз при помощи того же вакуум-насоса. Продувание камеры необходимо для удаления из нее продуктов сгорания, образовавшихся при взрыве.

Создание в камере газовой воздушной взрывчатой смеси происходит в том же порядке, за исключением того, что смесь составляется впуском в камеру соответствующего газа из промежуточного баллона 13.

Расчет необходимой дозировки паров жидкости или газа в смеси для получения заданной концентрации определяется по методу парциального давления по формуле

$$a = \frac{AK}{100} \text{ мм рт. ст.,}$$

где: а — парциальное давление паров горючей жидкости или газа в мм рт. ст.;

А — атмосферное давление (фактическое) в мм рт. ст.;

К — заданная концентрация паров горючей жидкости или газа в % по объему.

Например, для создания 5,5% смеси паров эфира с воздухом при атмосферном давлении в 740 мм рт. ст. необходимое парциальное давление паров эфира составит

$$a = \frac{740 \cdot 5,5}{100} = 40,7 \text{ мм рт. ст.}$$

Следовательно, уменьшив разрежение в камере при впуске в нее эфира на величину примерно 41 мм рт. ст., мы получим необходимую концентрацию паров эфира.

Из горючих жидкостей, имеющих температуру кипения выше 45—50° С, создать в камере паровоздушную смесь бывает затруднительно ввиду недостаточной испаряемости такой жидкости при нормальной температуре окружающего воздуха. В целях облегчения создания паров из таких жидкостей камера должна предварительно подогреваться на 5—10° С выше температуры кипения данной жидкости. Для такого подогрева в основании камеры (плите) и вверх внутри нее установлены нагревательные элементы 3. Контроль за температурой, создаваемой внутри камеры, осуществляется при помощи термомпары (располагаемой внутри нее) и гальванометра, а контроль включения или выключения нагревателей — электрической световой сигнализацией.

2. ВЗРЫВНАЯ КАМЕРА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПЫЛЕВЫХ СМЕСЕЙ

Для проведения исследований по выявлению воспламеняющей способности пылевых смесей от электрической искры была изготовлена вторая камера, приведенная на рис. 8. Конструктивное исполнение этой камеры позволяет проводить исследования на том же стенде.

Камера состоит из стеклянного цилиндра, заключенного в металлическую оправу, имеющую вырезы (окна) для наблюдения за работой искрящего механизма, а также за создаваемым внутри камеры пылевым облаком и процессом воспламенения его от электрической искры. Впуск

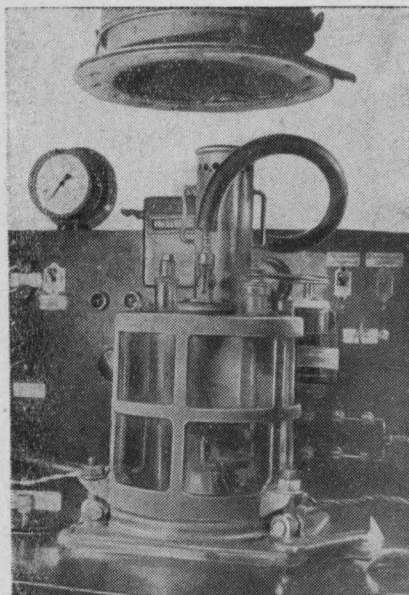


Рис. 8. Общий вид взрывной камеры для исследования зажигания электрической искрой пылевых смесей.

пыли в камеру в определенном количестве производится сжатым воздухом через верхний распыл, благодаря чему внутри камеры образуется пылевое облако, в котором и производится искрение при заданных параметрах электрической цепи. Конструкция камеры предусматривает также возможность создания пылевого облака путем поднятия пыли, осевшей на пол камеры, сжатым воздухом, подаваемым снизу через отверстие замкнутого кольца. Создание пылевого облака производится во время происходящего в камере искрения между размыкаемыми контактами.

Для правильности получаемых результатов при оценке воспламеняемости пылевоздушной смеси от электрической искры смесь должна создаваться в концентрации, превышающей нижний предел ее воспламенения на 50—100%.

3. МЕХАНИЗМЫ ИСКРЕНИЯ

В целях оценки работы, а также выбора механизма искрения, позволяющего получать наименьшие воспламеняющие токи, были испытаны различные конструкции таких механизмов с различными контактами искрения; описание их приводится ниже.

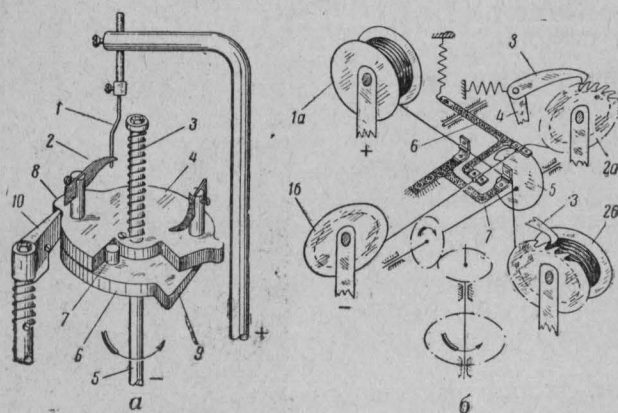


Рис. 9. Схемы работы искрящих механизмов:
а) при контактировании между острием иглы и заостренным концом пластинки;

1 — металлическая заостренная игла из вольфрама или облуженной латуни; 2 — стальная или латунная пластинка с заостренным концом; 3 — пружина; 4 — верхний диск; 5 — ведущий вал механизма; 6 — нижний диск; 7 — подвижный упор; 8 — выступы; 9 — защелка («собачка»);

б) при контактировании между попеременно соприкасающимися проволочками:
1, а и б — латунные токонесущие катушки; 2, а и б — пластмассовые катушки; 3 — храповое устройство; 4 — тяги; 5 — фигурный кулачок; 6, 7 — направляющие планки.

Искрящие контакты в виде иглы и заостренной пластинки (по схеме ИГД АН)

Схема устройства этого механизма приведена на рис. 9, а (положение перед размыканием контактов). При работе механизма искрение происходит между острием металлической иглы 1 и острозаточенным концом стальной или латунной облуженной пластинки 2, соскакивающей с острия иглы. Указанные детали механизма включены последовательно в цепь исследуемой схемы, питание которой осуществляется от заранее выбранного источника постоянного или переменного тока.

Изменение скорости размыкания искрящих контактов достигается изменением натяжения пружины 3, нижний конец которой закреплен на верхнем диске 4, свободно вращающемся на оси 5. Нижний диск 6, имеющий два диаметрально противоположных выступа 9, посредством шпонки закреплен на этой же оси. Вращение верхнему диску передается благодаря упору 7 нижнего диска. Искрение между иглой с заостренным концом пластинки происходит в тот момент, когда при вращении нижнего диска 6 «собачка» 10 отводится в сторону одним из упоров 9. Остановка верхнего диска 4 в момент касания контактов посредством «собачки» и выступа 8 предусмотрена для выдержки времени, достаточной для нарастания тока до его номинального значения перед тем, как произойдет размыкание (искрение) этого тока.

Искрящие контакты в виде пересекающихся проволочек (по схеме МАКНИИ)

Основными деталями этого механизма (рис. 9, б и 10) являются две металлические (латунные) токонесущие катушки 1, а и б, две пластмассовые катушки 2, а и б, имеющие храповое устройство 3. На металлические катушки перед запуском механизма в работу наматывается голая медная или стальная облуженная проволока калиброванного сечения диаметром 0,25—0,3 мм, длиной 10—12 м на каждую катушку. Концы проволочек закрепляются соответственно в каждой противоположной пластмассовой катушке. Таким образом, в «заряженном» состоянии механизма проволочки в горизонтальной плоскости расположены перпендикулярно одна к другой. Вращение катушек с храповыми колесами осуществляется через тяги 4, приводимые в движение от кулачков, укрепленных на валу привода механизма. При перемещении тяг 4 захваты 3, входя в зацепление с зубцами храповых колес, поворачивают их на некоторый угол. Тем самым проволочки перемещаются на расстояние 2—3 мм одна относительно другой, благодаря чему искрение происходит каждый раз на новом участке проволочек.

В целях избежания вибрации проволоочек и поддержания их во время размыкания (искрения) в натянутом состоянии они в зоне их касания между собой пропущены через направляющие зажимные рамки 6 и 7. При вращении вала привода текстолитовый фигурный кулачок 5 поднимает направляющую планку 6, через которую пропущена проволоочка от катушки 1, б, и замыкает ее с проволочкой, протянутой от катушки 1, а. Последующее вращение кулачка 5 вызывает соскакивание рамки 6 и тем самым размыкание контактирующих проволоочек.

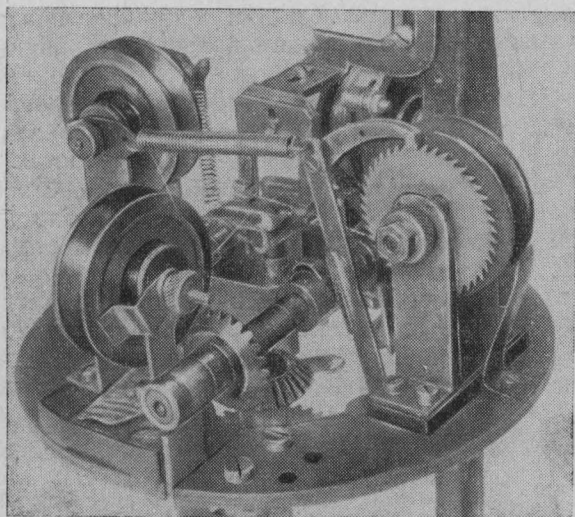


Рис. 10. Общий вид механизма искрения с пересекающимися проволочками.

Механизм настраивается таким образом, чтобы в момент соприкосновения и размыкания проволочек и при их движении относительно друг друга не происходило нарушения условий контактирования, которое могло бы произойти в процессе трения проволочек или их вибрации. Необходимое притирание контактирующих поверхностей проволочек обеспечивается в процессе их соприкосновения между собой.

Искрящие контакты в виде пластин (конструкция ИГД АН)

Этот механизм (рис. 11) состоит из основания 3, выполненного из изоляционного материала (пластмасса, гетинакс и т. п.), поддерживаемого металлическими стойками 2, при помощи которых он прикрепляется к плите взрывной камеры. В центре основания на двух роликовых подшипниках укреплен

валик, соединенный с приводом механизма при помощи муфты 1. На верш валика укреплен диск 4, на котором установлен подвижный контакт 5. Неподвижный контакт 9 установлен на удлиненной части основания механизма. Как подвижный, так и неподвижный контакты представляют собой латунные пластинки 8 сегментообразной формы толщиной 1 мм, прикрепленные двумя винтами к поддерживающим пластинкам контактных стоек 11. Нажим контактных пластинок при их соприкосновении между собой создается пружинами 10, укрепляемыми при помощи стальных винтов, установленных в верхних втулках 13, имеющих для удобства натяжения пружин накатанную поверхность. Для фиксации необходимого положения контактных пластин внизу каждой стойки имеется втулка-фиксатор 12 с упором и винтом. С противоположной стороны стойки неподвижного контакта на основании механизма укреплен латунный сектор 6, к которому присоединяется один провод от источника питания. Второй провод присоединяется к стойке 11 неподвижного контакта. Соединение подвижного контакта 5 с источником тока в момент искрения осуществляется при помощи щетки-контакта 7, скользящей по сектору 6.

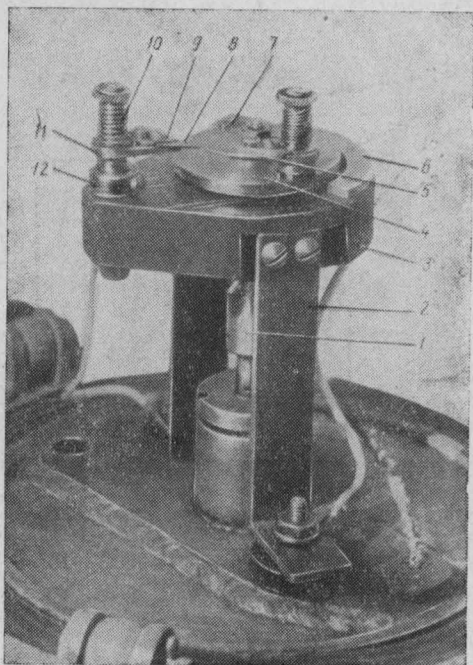


Рис. 11. Механизм искрения с пластинчатыми контактами:

1 — соединительная муфта; 2 — стойки; 3 — основание; 4 — контактный диск; 5 — подвижный контакт; 6 — контактный сектор; 7 — скользящий контакт; 8 — латунная пластинка; 9 — неподвижный контакт искрения; 10 — пружины; 11 — контактные стойки; 12 — фиксатор.

Искрящие контакты в виде размыкающихся проволочек (по схеме МАКНИИ) (второй вариант)

Устройство этого механизма приведено на рис. 12. Стойка 2, укрепленная на валу 1 привода механизма, имеет разъемные диски 3. Между этими дисками зажаты концы горизон-

тально расположенных проволонок 4, являющиеся подвижными контактами искрящего механизма. Неподвижный контакт в виде одной вертикально расположенной проволоочки 6 закреплен в колодке 7, имеющей возможность вертикально перемещаться для настройки контактирования проволок. Свободные концы подвижных проволок имеют изгиб в сторону, про-

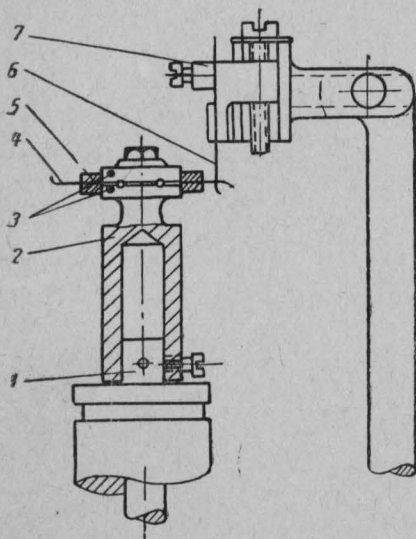


Рис. 12. Схема устройства механизма искрения между проволоками (второй вариант):

1 — вал привода; 2 — стойка; 3 — разъемные диски; 4 — подвижный проволоочный контакт; 5 — резиновое кольцо; 6 — неподвижный контакт; 7 — подвижная колодка.

тия.

Проволочки для подвижных и неподвижных контактов применялись диаметром 0,4 мм, стальные, облуженные. Количество подвижных контактов оказалось целесообразным брать не более 5 шт., так как при большем количестве очень трудно создать одинаковые условия искрения на всех контактах.

4 СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА РАБОТЫ МЕХАНИЗМОВ ИСКРЕНИЯ

При проведении экспериментальных работ было обнаружено, что на искрящем механизме конструкции (см. рис. 9, а) очень трудно добиваться одинаковых условий размыкания контактов, а следовательно, и одинакового характера искрения.

Это объясняется главным образом тем, что в процессе искрения происходит подгорание острия контактов, и оно тем

тивоположную вращению вала механизма. Благодаря этому размыкание цепи происходит не мгновенно, как это имело бы место при прямых концах проволок, а с некоторой задержкой за счет происходящего скольжения изогнутого конца подвижной проволоки по неподвижной. Этим в некоторой степени обеспечивается возможность установления тока (в момент соприкосновения проволок между собой до их размыкания) до минимального значения. В месте выхода проволок из латунных дисков 3 они пропущены сквозь резиновое кольцо 5. Наличие этого кольца исключает излом проволок за счет эластичности их крепления.

больше, чем больше величина тока, разрывающегося в искрящем промежутке. Такое подгорание, кроме того, вызывает не только загрязнение, а и изменение формы контактов, их затупление. Незначительное изменение в изгибе пластинки, в месте ее касания и по поверхности прилегания к стержню, также нарушает условия искрения.

Указанные причины, вызывающие эти изменения, в значительной степени изменяют величину энергии искрения в большую или меньшую сторону от ее оптимального значения, что невозможно учесть в процессе проведения опытов. Даже после зачистки контактов и придания им первоначальной остроты не всегда сразу удается получить ранее выявленные значения воспламеняющего тока. Лишь после длительной «настройки» контактов, на которую подчас уходит очень много времени, удается получить первоначальное значение воспламеняющего тока. Бывает и обратное явление: после «настройки» воспламеняющие токи оказываются меньшими. В таких случаях ранее полученные результаты не принимаются во внимание и последующие опыты проводятся при новой величине тока. Это крайне осложняет определение наименьшего значения воспламеняющего тока.

Положительной стороной конструкции механизма (см. рис. 9, б и 10) по сравнению с предыдущей является то, что замыкание контактов каждый раз происходит в новом месте соприкосновения проволочек благодаря продвижению их перед каждым размыканием. Это обстоятельство исключает различие в условиях искрения, а следовательно, устраняет влияние подгорания или истирания контактов и тем самым способствует получению сравнительно однородных искр размыкания.

В результате неоднократно проведенных экспериментов было установлено, что при одних и тех же параметрах схемы и соблюдении всех прочих условий равными, воспламенение взрывчатой смеси электрическими искрами происходит при очень близких между собой вероятностях воспламенения. Иначе говоря, получаемые результаты почти одинаковы как в начале, так и в конце экспериментов. Это является основным преимуществом данного механизма искрения по сравнению с другими приведенными конструкциями. Однако невозможность замедленного размыкания без конструктивного изменения фигурного кулачка 5 — существенный недостаток этого механизма. Другим недостатком его является значительная величина воспламеняющего тока. Так, например, при проверочных испытаниях в схеме с индуктивностью 0,22 гн, напряжении источника питания 6 в при проволочных контактах ток воспламенения в водородовоздушной среде составил 0,095 а; при тех же условиях, но на контактах пластинка — игла воспламеняющий ток составил всего 0,05 а, т. е. в 1,9 раза мень-

ше. Такая проверка при различных параметрах электрической цепи была произведена неоднократно, причем результаты были получены аналогичные. Величины воспламеняющих токов разнились в 1,5—2,0 раза. Подтверждением сказанного может служить табл. 5.

Т а б л и ц а 5

Смесь с воздухом	Напряжение источни- ка тока в в	Индуктивность цепи в гн	Величина тока и вероятность, при которой получено воспламенение смеси				Увеличение тока воспламенения
			Проволочные контакты		Острые контакты		
			ток в а	вероятность в р	ток в а	вероятность в р	
Водорода	6	0,22	0,095	$3,22 \cdot 10^{-1}$	0,05	$6,57 \cdot 10^{-1}$	1,9
Пропана	24	0,22	0,20	$2,14 \cdot 10^{-1}$	0,10	$1 \cdot 10^{-2}$	2,0
Ацетона	6	0,10	0,24	$1,14 \cdot 10^{-1}$	0,18	$1,1 \cdot 10^{-1}$	1,33
То же	6	0,022	1,0	$3,28 \cdot 10^{-1}$	0,50	$3 \cdot 10^{-1}$	2,0
"	24	0,65	0,18	$3,1 \cdot 10^{-1}$	0,095	$3 \cdot 10^{-1}$	1,9
"	24	0,022	0,6	$2,31 \cdot 10^{-2}$	0,40	$3,71 \cdot 10^{-2}$	—
"	24	0,001	4,0	$2,48 \cdot 10^{-1}$	2,30	$2,3 \cdot 10^{-1}$	1,74
"	60	0,65	0,125	$2,8 \cdot 10^{-1}$	0,06	$2,8 \cdot 10^{-1}$	2,1
"	60	0,22	0,17	$4 \cdot 10^{-1}$	0,11	$4 \cdot 10^{-1}$	1,55
"	60	0,022	0,45	$4,84 \cdot 10^{-2}$	0,30	$4,8 \cdot 10^{-2}$	1,5
"	60	0,001	1,10	$1,79 \cdot 10^{-1}$	0,95	$1,8 \cdot 10^{-1}$	1,15
Этилена	24	0,22	0,12	$3,2 \cdot 10^{-1}$	0,07	$1,3 \cdot 10^{-1}$	—
"	24	0,22	0,13	$1 \cdot 10^{-1}$	0,08	$1 \cdot 10^{-1}$	1,6
"	24	0,22	0,14	$2,3 \cdot 10^{-1}$	0,09	$9,8 \cdot 10^{-1}$	—

А. Г. Ихно на основании результатов своих исследований объясняет увеличение воспламеняющего тока при указанной системе контактов следующим образом [11]. Явление прекращения горения газовой смеси в узкой щели имеет место также и в том случае, когда искрение происходит между контактами, помещенными между параллельно расположенными поверхностями, с определенным расстоянием между ними.

Основываясь на этом явлении, он делает такой вывод. Горение газовой смеси, возникшее от электрической искры замыкания, не распространяется за пределы контактов, если искра во все периоды своего существования вписывается в объем, расположенный между защитными поверхностями контактов таким образом, что вокруг искры, между этими поверхностями, имеется щель определенной длины (рис. 13, а, б и в). Если же такой щели нет или искра выходит за пределы ука-

занного объема, то горение газовой смеси, начавшееся между контактами, беспрепятственно распространяется в пространстве за контактами (рис. 13, г).

Под защитными понимаются такие поверхности контактов, которые расположены вокруг них, непосредственно соприкасаются с искрой и находятся в зоне критической щели.

На рис. 13, а, б и в жирной линией обозначен след пересечения защитной поверхности секущей плоскостью, проходящей через контакты. Защитные поверхности у различных по размерам контактов различны. У контактов, указанных на рис. 13, а, они наибольшие, у контактов (рис. 13, г) — прак-

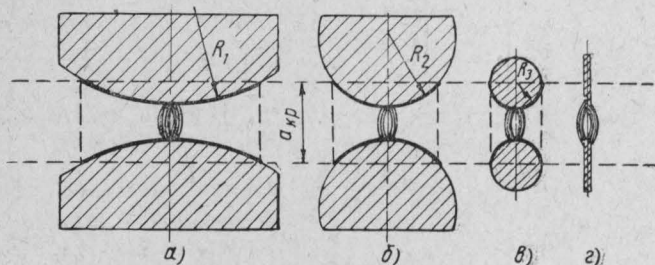


Рис. 13. Схема расположения защитных поверхностей на контактах, имеющих различные размеры и форму (на контактах а — защитные поверхности, обозначенные жирной линией, — наибольшие; на контактах г — практически отсутствуют).

тически равны нулю. Очевидно, чем меньше радиус выпуклости, тем меньше размеры защитных поверхностей. Следовательно, чтобы изучить процесс воспламенения газовых смесей от электрических искр размыкания, необходимо учитывать влияние защитных поверхностей и принимать меры к его устранению. При исследовании искр размыкания этого можно достичь, применяя очень тонкие проволоочки. По рекомендации А. Г. Ихно, диаметр их должен быть порядка 0,02—0,03 мм.

Механизм искрения с пластинчатыми контактами (см. рис. 11) по сравнению с механизмом с острыми контактами увеличивает величину воспламеняющего тока в 1,2—1,3 раза. Следует отметить значительную трудность настройки данного механизма. Он не может быть рекомендован из-за большой величины воспламеняющего тока.

Лучшим из приведенных является механизм, указанный на рис. 12. В результате экспериментов установлено, что здесь воспламеняющие токи в 1,15—1,4 раза меньше по сравнению с токами воспламенения, полученными на механизме, изображенном на рис. 9, а.

Настройка контактирующих проволочек не вызывает боль-

щих затруднений, если их взято не более пяти. При этом работа их достаточно устойчива. Необходимо лишь в процессе проведения экспериментов следить за положением горизонтальных проволочек по отношению к вертикальной контактирующей проволочке. Установка на вращающемся диске больше пяти проволочек затрудняет настройку их в смысле получения одинакового характера искрения на каждой проволочке.

Результаты исследований позволяют рекомендовать механизм искрения, приведенный на рис. 12, для испытаний электрических приборов и устройств на искробезопасность.

5. ПРИВОД МЕХАНИЗМА ИСКРЕНИЯ

Кинематическая схема привода механизма искрения представлена на рис. 14. Редукторная часть привода дает возможность устанавливать ведомый вал механизма искрения на 80, 40 и 2 об/мин. при 1440 об/мин. электродвигателя. Редуктор состоит из двух червячных передач, одной пары конических шестерен и пяти нормальных цилиндрических шестерен.

Различная величина числа оборотов ведомого вала механизма искрения позволяет получать разное число искрений в минуту, а также осуществлять различные скорости размыкания искрящих контактов. При этом необходимо иметь в виду, что скорость размыкания контактов не всегда может быть оценена числом оборотов вала механизма. В зависимости от примененной конструкции механизма искрения эта скорость может зависеть только от натяжения в нем пружины 3 (см. рис. 9, а).

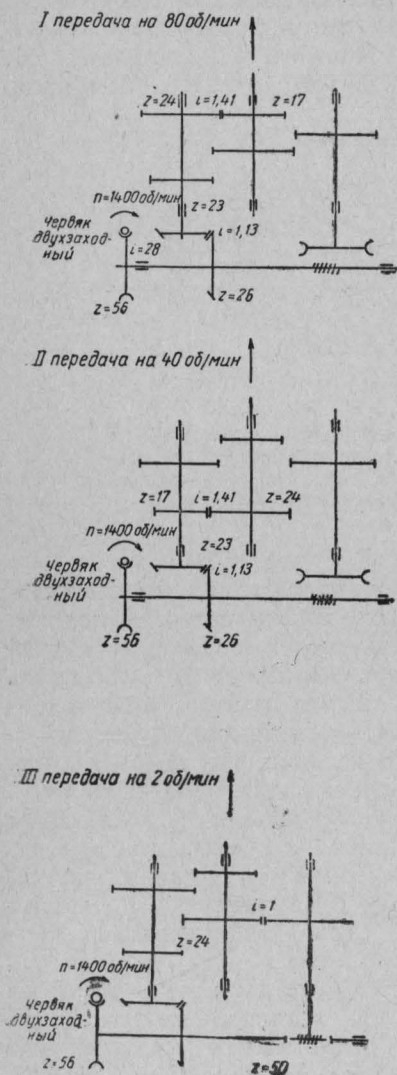


Рис. 14. Кинематическая схема привода механизма искрения.

То же самое положение мы имеем при применении механизма искрения с контактами из пересекающихся проволочек (см. рис. 9, б и 10). Что же касается механизма с пластинчатыми контактами или с контактами из размыкающихся проволочек (см. рис. 11 и 12), то в данном случае имеется прямая зависимость скорости размыкания контактов от числа оборотов ведомого вала механизма искрения.

6. ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ СХЕМА УСТАНОВКИ

На рис. 15 представлена принципиальная электрическая схема установки, состоящая из силовой цепи, цепи управления

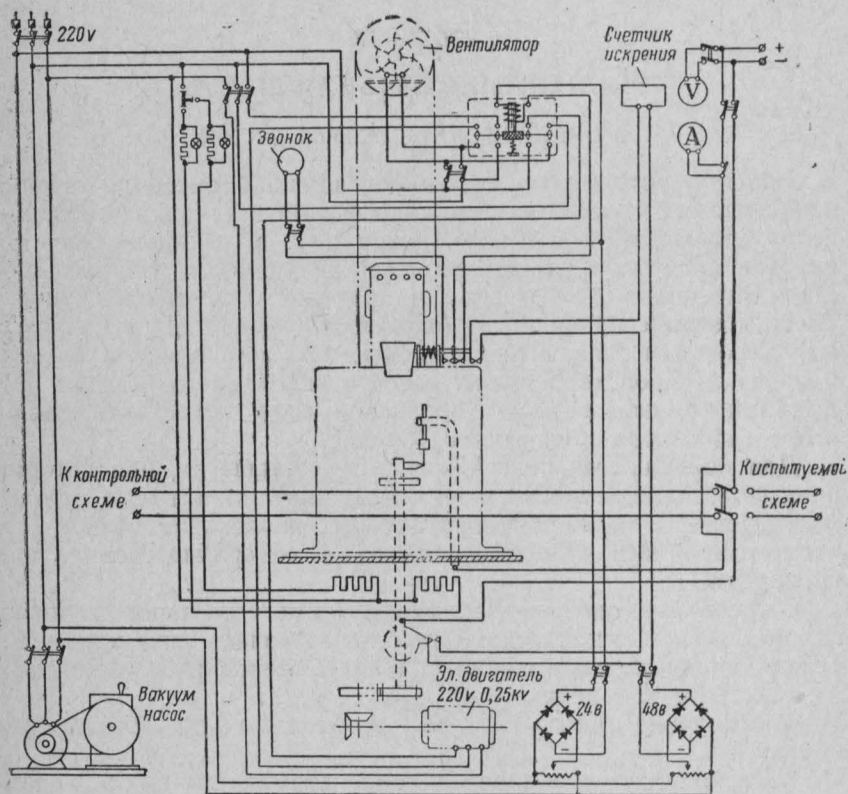


Рис. 15. Принципиальная электрическая схема экспериментальной установки.

и схемы для подключения испытательной электрической цепи при проведении исследований или испытаний приборов.

Силовая цепь установки питается от внешней сети 3-фазного тока напряжением 220 в. Эта цепь обеспечивает работу

электродвигателей вакуум-насоса, привода искрящего механизма, нагревательных элементов для подогрева камеры и работу вентилятора. Цепь управления питается от внешней сети через выпрямительное устройство на 24 и 48 в постоянного тока.

Испытуемая схема при проведении опытов по искрению присоединяется к одной паре клемм, ко второй паре клемм этой цепи присоединяется схема с неизменными параметрами для контроля работы как искрящего механизма, так и взрывчатости созданной в камере смеси. Питание испытуемой схемы осуществляется от специальной аккумуляторной батареи с тем напряжением, которое выбрано для проведения исследований.

ГЛАВА IV

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОСТАВА СМЕСИ

Известно, что любая газо-паровоздушная смесь по ее воспламеняющей способности от какого-либо источника воспламенения (пламя, нагретое тело, искра и т. п.) характеризуется нижним и верхним пределами воспламеняемости (взрываемости). Вне нижнего и верхнего пределов газо-паровоздушные смеси практически не могут быть воспламенены. При содержании паров или газа в смеси меньше нижнего предела воспламенения не происходит из-за недостатка горючего, а при содержании больше верхнего предела — из-за недостатка кислорода, способного поддержать горение.

Для большинства смесей известны составы их, при которых развиваются наибольшие взрывные давления, а также стехиометрические соотношения, при которых происходит полное сгорание смесей без избытка горючего и содержащегося в них кислорода.

Однако при оценке воспламеняемости газо-паровоздушных смесей электрической искрой необходимо знать, при каком составе данная смесь является наиболее легко воспламеняемой от электрической искры.

Определение такого состава необходимо по следующим причинам:

1. Любая газо- или паровоздушная взрывчатая смесь, характеризуемая по наибольшему взрывному давлению или по стехиометрическому соотношению*, как правило, не совпадает со смесью, которая является наиболее легко воспламеняемой от электрической искры.

* Стехиометрическое соотношение — это теоретически наивыгоднейшее соотношение компонентов смеси, т. е. паров горючего или газа и кислорода в воздухе, при которых происходит полное сгорание.

2. В нашем распоряжении нет данных как из отечественной, так и из зарубежной литературы по такому составу смесей.

В связи с изложенным, перед проведением основных исследований по определению искробезопасных параметров произ-

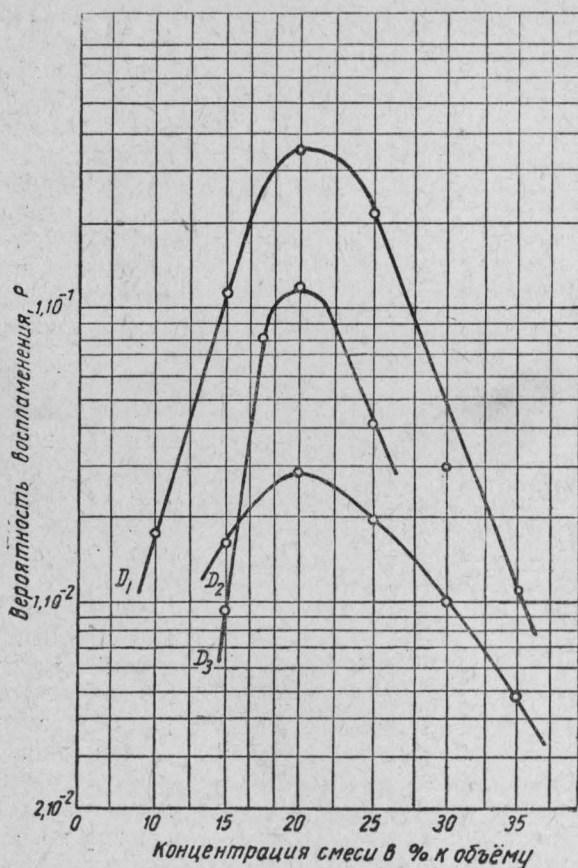


Рис. 16. Зависимость статистической вероятности воспламенения от концентрации газа в смеси (водород):
 D_1 — 24 в; 0,02 гн; 0,1 а; D_2 — 24 в; 0,22 гн; 0,15 а;
 D_3 — 60 в; 0,16 гн; 0,05 а.

водилось определение состава смеси, при котором данная смесь является наиболее легко воспламеняемой от электрической искры.

Методика такого определения состояла в следующем. При любых взятых параметрах электрической цепи (ток, индуктивность, напряжение) набирается заданное количество поло-

жительных опытов ($m=30$). По числу произведенных в камере искрений (n), вызвавших 30 воспламенений, определяется статистическая вероятность этого воспламенения.

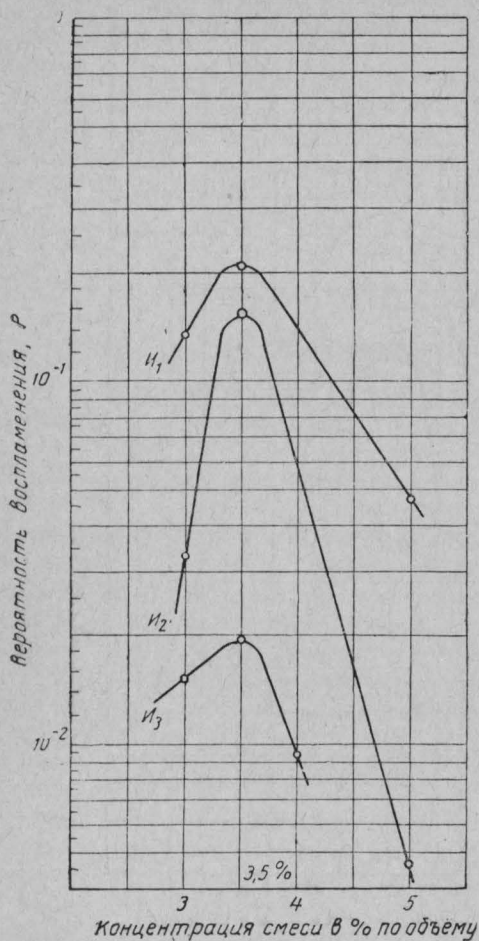


Рис. 17. Зависимость статистической вероятности воспламенения от концентрации горючей жидкости в смеси (бензин Б-70): I_1 — 24 в; 0,22 гн; 0,13 а; I_2 — 24 в; 0,22 гн; 0,18 а; I_3 — 24 в; 0,22 гн; 0,2 а.

Вначале опыты проводятся при одной концентрации паров горючего или газа в смеси. Затем концентрация изменяется и проводится следующая серия опытов (30 воспламенений смеси). Таким образом определяются различные концентрации, лежащие в пределах воспламенения данной смеси. В целях проверки получаемых результатов эксперименты ставятся при различных параметрах электрической цепи, но при одних и тех же концентрациях паров или газа, входящих в исследуемую смесь. По полученным результатам строятся зависимости вероятности воспламенения от изменения концентрации в смеси.

На рис. 16 приведены графики для водородо-воздушной смеси, где по оси ординат отложены вероятности воспламенения, а по оси абсцисс — концентрация смеси.

На рис. 17 представлен такой график для бензино-воздушной смеси.

На рис. 18 приведен общий график для нескольких исследованных смесей.

Из этих графиков можно видеть, что независимо от параметров электрической цепи наибольшая вероятность воспламе-

нения находится при одном определенном составе смеси. Так, например, водородо-воздушная смесь является наиболее легко воспламеняемой при содержании водорода в количестве 20%, бензино-воздушная — при содержании бензина 3,5% и т. д.

При рассмотрении приведенных графиков видно, что такой метод определения наиболее легко воспламеняемой смеси исключает ошибку, так как опыты проводятся при различных условиях искрения.

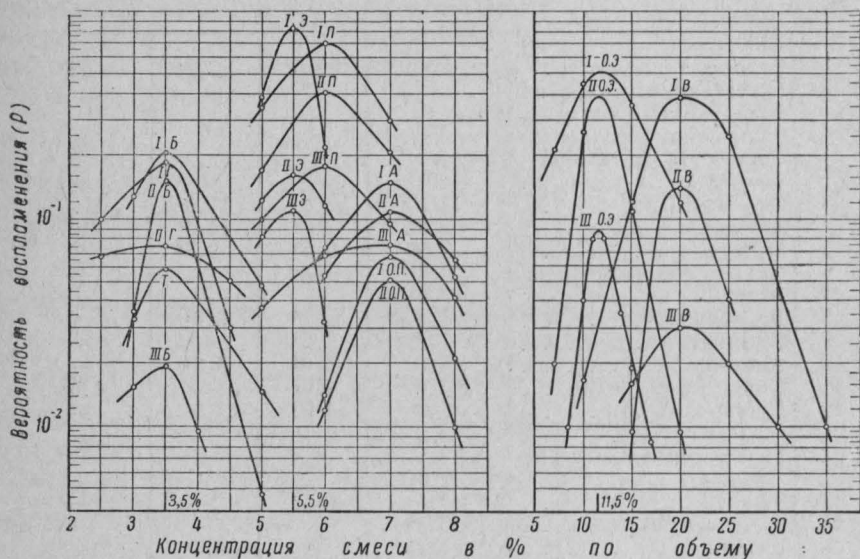


Рис. 18. Зависимость статистической вероятности воспламенения от концентрации горючего или газа для смеси с воздухом:

Г — гептана, Б — бензина, Т — толуола, Э — эфира, П — пропана, А — ацетона, О. П. — окиси пропилена; О. Э. — окиси этилена; В — водорода.

Интересно совпадение полученных нами данных по водороду с данными, приведенными в немецком журнале [21], где сказано, что при 20-процентном содержании водорода в воздухе смесь является наиболее легко воспламеняемой от электрической искры.

В табл. 6 помещены полученные нами значения концентрации наиболее легко воспламеняемых смесей, дополненные данными из других источников, а также приведены стехиометрические соотношения для нескольких смесей.

Из табл. 6 можно видеть, что для большинства смесей (исключая водород и метан) величина концентрации горючего или газа, при которой смесь является наиболее легко воспламеняемой, большая по сравнению с концентрацией при стехиометрическом соотношении.

Таблица 6

№ п.п.	Смесь с воздухом	Состав смеси, содержащей пары горючей жидкости или газ в процентах по объему, соответствующий			
		наиболее легкому воспламенению от искры размыкания	стехиометрическому соотношению	наибольшему взрывному давлению	наиболее опасному по передаче взрыва через шелевой зазор оболочку
1	Водорода	20	29,5 ³	32,3 ⁴	32 ⁵
2	Естественного газа из фонтанных нефтяных скважин (содержание CH ₄ -метана 93—96%)	10 ¹	—	—	—
3	Окиси этилена	11,5	7,8	11,0 ⁴	11,0 ⁵
4	Ацетилена	9,25	7,7 ³	14,5 ⁴	14,5 ⁵
5	Метана	8,5 ²	9,5 ³	9,8 ⁴	—
6	Сухого газа пиролиза	8,0 ¹	—	—	—
7	Этана	7,0 ²	—	—	—
8	Этилена	7,0	6,5 ³	8,4 ⁴	5,0 ⁵
9	Пропилена	7,0	4,5 ³	—	—
10	Ацетона	7,0	5,0 ³	6,3 ⁴	—
11	Окиси пропилена	7,0	4,47	—	4,5 ⁵
12	Пропана	6,0 ²	4,03	4,6 ⁴	—
		5,0			
13	Газа термического крекинга	6,0 ¹	—	—	—
14	Эфира	5,5	3,4 ³	—	—
15	Диэтиламина	5,0	—	—	—
16	Бутана	4,2 ²	—	3,6 ⁴	—
17	Пентана	4,0 ²	2,6	3,0 ⁴	—
18	Гептана	3,5	—	—	—
19	Толуола	3,5	—	—	—
20	Бензина Б-70	3,5	—	—	—
		121			
		мг/л ¹			
21	Бензола (уд. вес 0,9012)	216,0	2,7 ³	3,9 ⁴	—
		мг/л ¹			

¹ Данные ВНИИТ МНП СССР.

² Данные Д. Моргана «Принципы зажигания», Машгиз, 1947.

³ Данные В. Иоста «Взрывы и горение в газах».

⁴ Британский стандарт № 229, 1946.

⁵ Данные ЦНИИПО. (Ульященко В. Е.)

2. ВЛИЯНИЕ СКОРОСТИ РАЗМЫКАНИЯ

Помимо различных факторов, оказывающих существенное влияние на воспламеняющую способность искрения, большое значение имеет также скорость размыкания контактов.

В процессе исследования [8] было установлено, что при электрическом искрении в индуктивных схемах скорость размы-

кания контактов должна быть наибольшей. В схемах же практически безреактивных, т. е. имеющих очень небольшую индуктивность (0,001 гн и меньше), скорость размыкания, наоборот, должна быть незначительной, обеспечивающей получение затяжного искрения.

Необходимость соблюдения этих условий объясняется следующим. При включении электрической цепи, обладающей омическим сопротивлением и индуктивностью, с возрастанием тока в цепи до его конечного значения вокруг катушки индуктивности возникает магнитное поле, на создание которого расходуется часть энергии из источника тока. При возникновении этого магнитного поля в катушке индуцируется э. д. с. самоиндукции, равная

$$l_L = -L \frac{di}{dt}.$$

Таким образом, приложенное напряжение на зажимах цепи состоит из двух слагаемых

$$U = ir - l_L = ir + L \frac{di}{dt}.$$

Первое слагаемое напряжение ir , определяемое по закону Ома, представляет собой потерю напряжения в проводах на омическое сопротивление цепи; второе слагаемое $L \frac{di}{dt}$ равно по величине и противоположно по направлению э. д. с. самоиндукции.

Увеличение скорости размыкания цепи увеличивает скорость снижения тока $\frac{di}{dt}$ и тем самым увеличивает э. д. с. самоиндукции $l_L = -L \frac{di}{dt}$, направленную на поддержание величины тока в разряде. Поэтому, если скорость велика, то электрическую дугу удастся еще удержать при меньших величинах тока и тем полнее реализовать в разряде энергию магнитного поля, запасенную в цепи, величина которой ориентировочно определяется соотношением $\frac{LI^2}{2}$ [8].

Поэтому при проведении практических испытаний на искробезопасность безреактивных электрических цепей «затяжные» искры, получающиеся при медленном размыкании, являются более опасными, а при размыкании индуктивных цепей, наоборот, более опасными являются искры, получающиеся при быстром размыкании.

В литературе [1] отмечается справедливость этих выводов и приводятся примеры, когда при мгновенном размыкании исследуемой электрической цепи минимальная величина воспламеняющего тока была равна 0,25 а, при медленном размыкании в тех же условиях потребовалось увеличение тока до 0,6 а.

В целях получения наименьших значений воспламеняющих токов исследование нами проводилось при различных скоростях размыкания тока в зависимости от величины индуктивности цепи. В цепях, практически безреактивных, размыкание тока проводилось как при замедленном, так и при быстром разрыве цепи, что позволило получить сравнительные данные по величине воспламеняющего тока для этих цепей. Размыкание индуктивных цепей проводилось с большой скоростью.

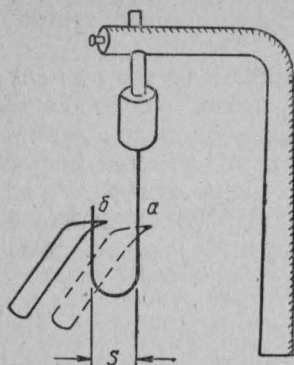


Рис. 19. Форма контактного устройства при осциллографировании скорости размыкания:

а) положение пластины при замыкании; б) положение пластины при размыкании.

Было установлено, что увеличение скорости (больше 1 м/сек) при размыкании индуктивных цепей и уменьшение скорости (меньше 0,5 м/сек) при размыкании безындуктивных цепей не приводят к снижению воспламеняющего тока. Поэтому при проведении исследований придерживались указанных скоростей размыкания тока.

Для проверки получаемых при экспериментах скоростей размыкания неподвижному контакту была придана форма, изображенная на рис. 19. Величина S являлась тем расстоянием, которое должен пройти заостренный конец подвижного контакта при его

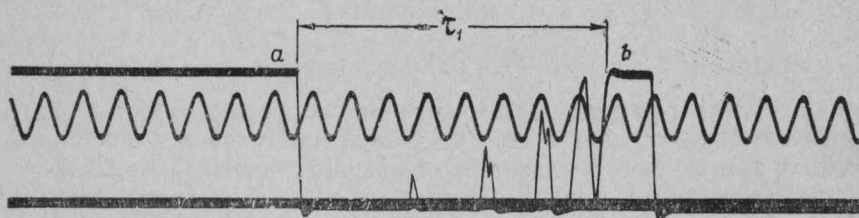


Рис. 20. Осциллограмма скорости размыкания контактов. Контакты: остро-заточенная пластинка и игла из облуженной латуни.

Расстояние между контактами $S = 2$ см. Время по отметке осциллограммы

$$\tau_1 = \frac{8}{500} \text{ сек.}$$

Скорость размыкания контактов

$$v_1 = \frac{S}{\tau_1} = \frac{0,02 \cdot 500}{8} = 1,25 \text{ м/сек.}$$

движению от точки а до точки б в процессе замыкания и размыкания цепи.

На рис. 20 приведена одна из осциллограмм такого размыкания тока между острием иглы и концом заостренной пла-

стинки (см. рис. 9 а). При расстоянии S , равном 2 см, и при частоте тока осциллографа, равном 500 гц, получаем, что время разрыва цепи $\tau_1 = \frac{8}{500}$ сек., скорость размыкания контактов составила

$$v_1 = \frac{S}{\tau_1} = \frac{0,02 \cdot 500}{8} = 1,25 \text{ м/сек.}$$

На рис. 21 приведена осциллограмма размыкания тока на проволочных контактах (см. рис. 9, б) из облуженной меди

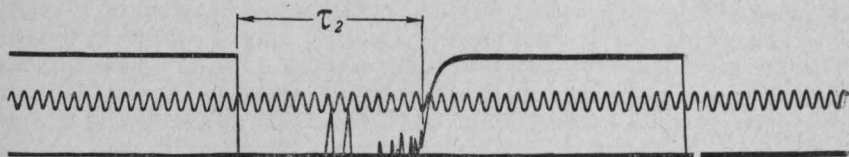


Рис. 21. Осциллограмма скорости размыкания контактов. Контакты: медные облуженные проволочки диаметром 0,25 мм. Расстояние между контактами

$$S = 11 \text{ мм. Время по отметке осциллограммы } \tau_2 = \frac{15}{500} \text{ сек.}$$

$$\tau_2 = \frac{15}{500} \text{ гц. Скорость размыкания контактов}$$

$$v_2 = \frac{S}{\tau_2} = \frac{0,011 \cdot 500}{15} = 0,36 \text{ м/сек.}$$

диаметром 0,25 мм $S = 1,1$ см. Данная осциллограмма зафиксировала скорость размыкания

$$v_2 = \frac{S}{\tau_2} = \frac{0,011 \cdot 500}{15} = 0,36 \text{ м/сек.}$$

Следовательно, в первом случае механизм искрения был отрегулирован правильно, так как скорость была получена не менее 1 м/сек; во втором случае необходимо было увеличить скорость размыкания путем увеличения натяжения пружин механизма искрения. Аналогичная проверка производилась и при замедленном размыкании, при котором скорость устанавливалась не более 0,5 см/сек. Влияние скорости размыкания в безындуктивных цепях (0,001 и 0,0001 гн) подтверждается приведенными в табл. 7 и 8 значениями воспламеняющих токов. В числителе указаны токи, полученные при замедленном, а в знаменателе — при быстром размыкании контактов.

3. ВЛИЯНИЕ МАТЕРИАЛА КОНТАКТОВ

Как уже отмечалось в обзоре литературы, некоторыми авторами было установлено, что на воспламеняющую способность

оказывает влияние не только форма контактов, но и материал, из которого контакты изготовлены.

В целях получения дополнительных данных по этому вопросу нами были поставлены соответствующие эксперименты в этилено-воздушной смеси. Опыты проводились при искрении на

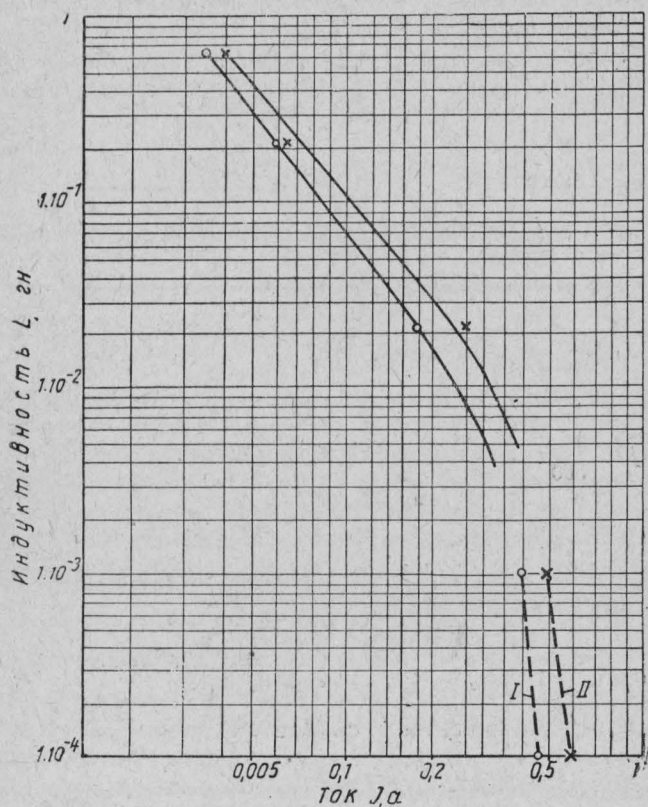


Рис. 22. Экспериментальные кривые воспламеняющих токов при различных индуктивностях цепи (от 0,0001 до 0,65 гн) и напряжении источника постоянного тока 60 в. Контакты: кривая I — из облуженной латуни; кривая II — игла (из вольфрама) — пластинка (нержавеющая сталь).

контактах, выполненных в виде иглы и острозаточенного конца пластинки. В одной серии опытов эти контакты были изготовлены из облуженной латуни, в другой игла была сделана из вольфрама, а пластинка — из нержавеющей стали. В тех и других опытах напряжение источника постоянного тока было 60 в при различной индуктивности в цепи: 0,0001; 0,001; 0,022;

0,22 и 0,65 гн. При индуктивностях 0,001 и 0,0001 гн искрение проводилось при замедленном размыкании контактов.

Результаты опытов показаны на рис. 22. По вертикальной оси отложены величины индуктивности, а по горизонтальной оси—воспламеняющие токи, полученные в пределах вероятностей воспламенения: $4 \cdot 10^{-1}$ — $8 \cdot 10^{-1}$. Кривая *I* получена на контактах, выполненных из облуженной латуни; кривая *II*—на контактах: игла (вольфрам)—пластинка (нержавеющая сталь).

Из приведенного видно, что воспламеняющие токи при искрении на контактах из облуженной латуни меньше по сравнению с токами воспламенения на контактах, составленных из пары вольфрам—сталь. Это обстоятельство указывает на то, что при испытаниях и конструировании искробезопасных аппаратов и устройств необходимо учитывать влияние не только формы контактов, но и материала, из которого они изготовлены.

ГЛАВА V

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

1. КРИВЫЕ ВЕРОЯТНОСТЕЙ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ

Любая газо-паровоздушная взрывчатая смесь может быть оценена по ее воспламеняемости от электрической искры лишь после получения значения тока, соответствующего крайне малой вероятности воспламенения при определенных значениях индуктивности и напряжения электрической цепи.

Ранее было сказано, что такие опыты целесообразнее проводить в смесях с концентрациями паров горячей жидкости или газа, при которых эти смеси являются наиболее легко воспламеняемыми от электрической искры. При других концентрациях любая паро-газовоздушная смесь, находящаяся в границах между нижним и верхним пределами воспламеняемости (взрываемости), также может быть зажжена электрической искрой, однако значения воспламеняющих токов при этом будут большими.

В целях выявления наименьших значений воспламеняющих токов исследования проводились в наиболее легко воспламеняемых смесях.

Согласно методике исследований, во взрывной камере, заполняемой исследуемой взрывчатой смесью, сначала определяется вероятность воспламенения P_1 , соответствующая какому-то току I_1 .

Далее, ток искрения уменьшают до I_2 и определяют меньшую вероятность воспламенения P_2 , затем при токе I_3 нахо-

дят P_3 и т. д. При этом величина напряжения и индуктивность электрической цепи сохраняются постоянными.

Скорость размыкания контактов при экспериментах обеспечивается: для индуктивных цепей не менее $1,0 \text{ м/сек}$; для практически безындуктивных цепей (от $0,001 \text{ гн}$ и меньше) — не больше $0,5 \text{ см/сек}$. Получив, таким образом, несколько значений вероятностей воспламенения при разных величинах воспламеняющего тока, производят построение зависимости $P=f(I)$ в

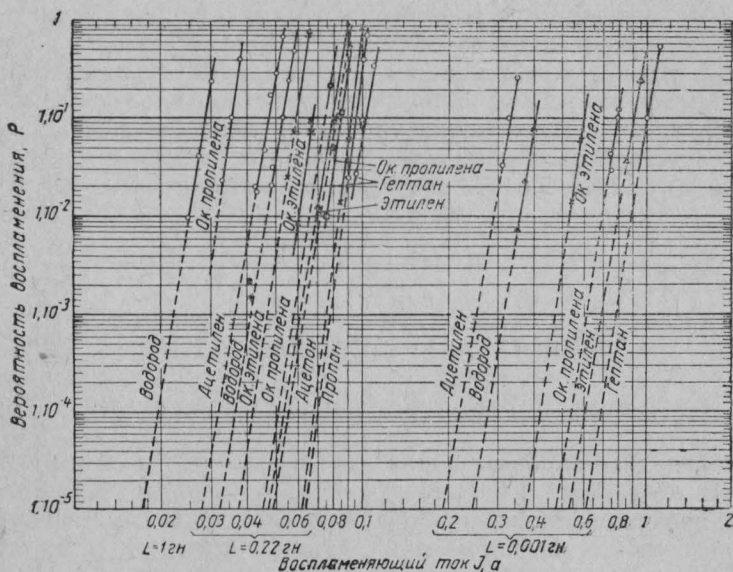


Рис. 23. Экспериментальные зависимости вероятности воспламенения $P=f(I)$ в нескольких газо-паровоздушных смесях.

Напряжение источника тока 246 в.

логарифмической системе координат, где по оси ординат откладываются вероятности воспламенения, а по оси абсцисс — воспламеняющие токи.

На рис. 23 для примера приведена небольшая часть экспериментально полученных зависимостей вероятности воспламенения от величины размыкаемого тока при напряжении источника тока 24 в и индуктивности цепи 1; 0,22 и 0,001 гн для смесей ацетилена, водорода, этилена, окиси этилена, окиси пропилена, ацетона, пропана, гептана с воздухом. Аналогичные зависимости были получены и при напряжении 6 и 60 в и индуктивностях от 0,0001 до 0,65 гн.

Как видно из приведенных графиков вероятностей воспламенения, линии графиков на участке вероятностей от 1 до 10^{-2}

имеют прямолинейный характер и, следовательно, отвечают уравнению

$$\frac{P_1}{P_3} = \left(\frac{I_1}{I_3} \right)^{\operatorname{ctg} \alpha}.$$

Считая, что и при меньших вероятностях эта прямолинейность сохраняется, и зная угол наклона этих кривых, можно определить величину тока для другой заданной условной вероятности воспламенения, например $P_n = 10^{-5}$.

Как было сказано раньше, такое определение можно произвести графическим и расчетным путем. При графическом определении тока достаточно продолжить линию вероятности до пересечения ее с осью абсцисс, соответствующей условной вероятности воспламенения. Точка пересечения укажет искомую величину тока. Определение тока расчетным путем можно произвести по ранее приведенным формулам (2) или (3) (см. гл. II «Методика исследований»).

Пример определения тока путем расчета. Допустим, в смеси ацетилена с воздухом при искрении в цепи с индуктивностью 0,22 гн и напряжения 24 в был получен воспламеняющий ток $I_1 = 0,0425$ а. Вероятность воспламенения P при этом токе, по получении 30 воспламенений m смеси при 1430 выполненных искрениях n в камере, выразилась $2,1 \cdot 10^{-2}$. Средняя величина угла наклона для ацетилено-воздушной смеси при контактах (игла+острие пластины) равна $86^{\circ} 36'$ ($\operatorname{ctg} \alpha = 16,67$). Определим величину тока, соответствующую условной вероятности, например $P_n = 10^{-5}$ по формуле (2)

$$I_n = I_1 \left(\frac{P_n}{P_1} \right)^{\frac{1}{\operatorname{ctg} \alpha}}.$$

Подставив полученные значения, найдем искомую величину тока

$$I_n = 0,0425 \left(\frac{10^{-5}}{2,1 \cdot 10^{-2}} \right)^{\frac{1}{16,67}} = 0,027 \text{ а.}$$

При подсчете тока по формуле (3) получим

$$I_n = I_1 \left(\frac{P_n n}{t_{\varepsilon}} \right)^{\operatorname{ctg} \alpha} = 0,0425 \left(\frac{10^{-5} \cdot 1430}{44,2} \right)^{0,059} = 0,0265 \text{ а,}$$

где $t_{\varepsilon} = 44,2$ взято из таблицы; соответствующее $m = 30$ при $\varepsilon = 0,01$ (см. стр. 17).

При графическом определении этот ток равен 0,0275 а. Следовательно, результаты, полученные расчетом и графическим путем, практически одинаковые, что подтверждает точность данного метода. Практическая ценность получаемых результатов по данному методу состоит еще и в том, что по экспери-

ментально найденной величине воспламеняющего тока можно вычислить значение тока, соответствующее любой заранее заданной условной вероятности воспламенения, не производя при этом большого количества опытов.

Необходимо отметить, что при таком методе допускается некоторая условность в определении минимального значения тока. Эта условность состоит в том, что принимается сохранение прямолинейности линий вероятностей $P=f(I)$ при их продолжении в область меньших вероятностей воспламенения. Имеется ли такая прямолинейность в действительности, экспериментально не установлено.

Для доказательства наличия такой прямолинейности этих линий экспериментальным путем потребовались бы проведение очень большого количества опытов и выполнение многих миллионов искрений во взрывчатой смеси, что связано со значительными трудностями и очень большой затратой времени.

Полученные результаты исследований более чем в десяти различных смесях указывают на вероятностный характер воспламенения этих смесей электрической искрой независимо от их физических или химических свойств. Вероятностный характер воспламенения ранее был установлен В. С. Кравченко при проведении им исследований в метано-воздушной смеси. Результаты наших исследований подтверждается также наличие определенной закономерности между вероятностью воспламенения и величиной воспламеняющего тока. Эта закономерность сохраняется при одном угле наклона кривых вероятностей воспламенения применительно к одной форме контактов и одному способу их размыкания. При другой форме контактов и другом способе их размыкания угол наклона кривых вероятностей изменяется, но также сохраняется его постоянство. Так, например, на искрящем устройстве в виде иглы и острия пластинки (см. рис. 9, а) среднее значение угла наклона равно $87^{\circ} 02'$ ($\operatorname{tg} \alpha = 19,30$). При искрении на проволочных контактах (см. рис. 9, б) средний угол наклона составил $83^{\circ} 47'$ ($\operatorname{tg} \alpha = 9,18$).

Исследованиями, проведенными В. С. Кравченко [18], установлено, что угол наклона кривых $P=f(I)$ изменяется также от частоты производимого искрения. Так, например, в метано-воздушной смеси при частоте одна искра в секунду угол наклона был около $86^{\circ} 30'$ ($\operatorname{tg} \alpha = 16,34$), при 100 искр/сек. — примерно $88^{\circ} 30' 30''$ ($\operatorname{tg} \alpha = 38,5$). Следовательно, при определении минимального значения тока графическим или расчетным путем следует учитывать, на каком искропроизводящем устройстве и с какой частотой искрения производились эксперименты.

2. ХАРАКТЕРИСТИКИ ИСКРОБЕЗОПАСНОСТИ

При непосредственной оценке воспламеняющей способности электрического искрения в какой-либо газо-паровоздушной сме-

си удобнее пользоваться характеристиками искробезопасности. Эти характеристики также строятся в логарифмической системе координат, выражают зависимость воспламеняющего тока от изменения индуктивности электрической цепи при постоянной величине напряжения источника тока $I = f(L)$ при

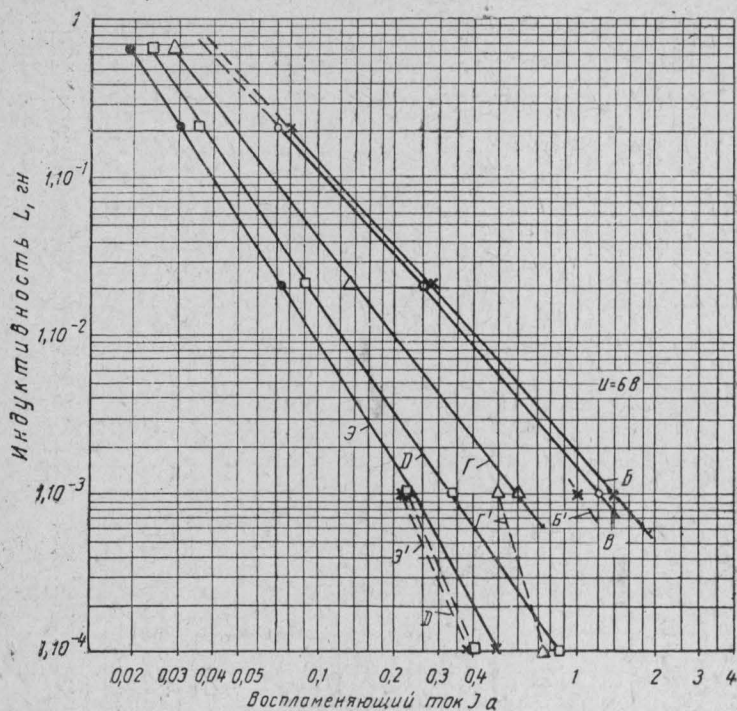


Рис. 24. Экспериментальные характеристики искробезопасности при напряжении 6 в постоянного тока. Условная вероятность воспламенения $P = 10^{-5}$ для взрывчатых газо-паровоздушных смесей:

Э — ацетилен; Д — водород; Г — этилен; В — пропан; Б — ацетон; Е — метан.

$U = \text{const}$. Характеристики строятся по значениям токов, соответствующих выбранной условной вероятности воспламенения, например $P_n = 10^{-5}$. При построении характеристик по оси ординат откладываются значения индуктивностей, по оси абсцисс — значения воспламеняющих токов.

На рис. 24 приведены характеристики искробезопасности для нескольких из исследованных взрывчатых смесей (Э — ацетилена, Д — водорода, Г — этилена, В — пропана, Б — ацетона, Е — метана)* при напряжении источника постоянного тока 6 в и индуктивности электрической цепи от 0,0001 до 0,65 Гн.

* По данным ИГД АН — СССР (В. С. Кравченко).

На рис. 25 даны характеристики искробезопасности с другими смесями: *K* — окиси этилена, *A* — эфира, *E* — метана при напряжении постоянного тока 24 в и индуктивности от 0,0001 и 0,001 до 0,65 гн. На рис. 26 приведены характеристики для тех же смесей и индуктивностей при напряжении 60 в.

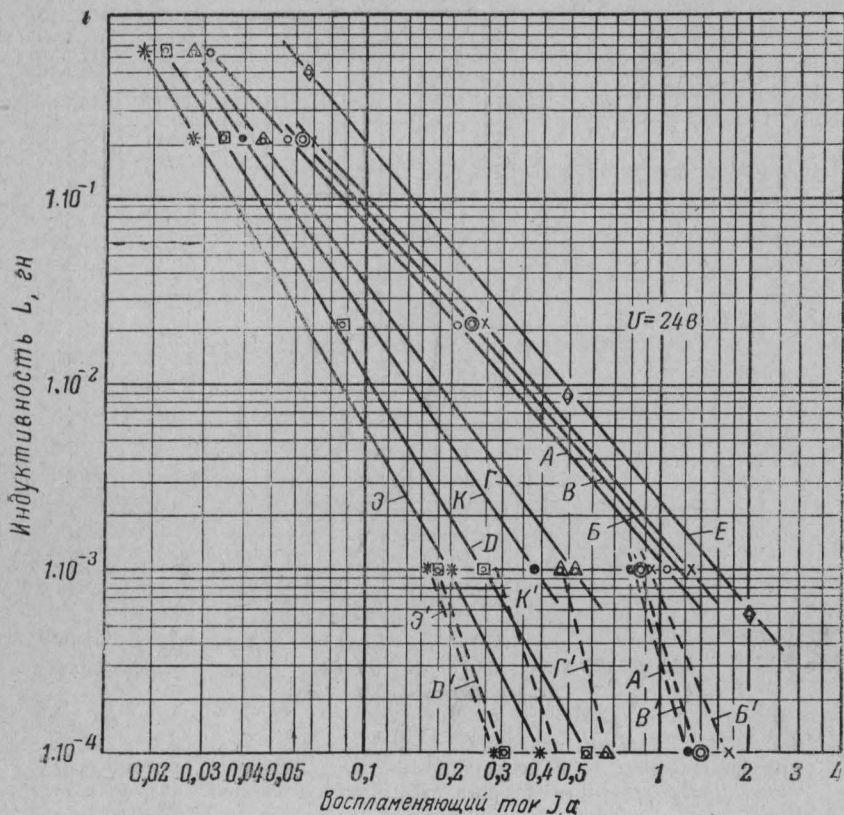


Рис. 25. Экспериментальные характеристики искробезопасности при напряжении 24 в. Постоянный ток. Условная вероятность воспламенения $P = 10^{-5}$.

Для газопаровоздушных смесей:

Э — ацетилен; Д — водород; Г — этилен; А — эфир; В — ацетон; Б — пропан; Е — метан; К — окись этилена.

Эти характеристики построены для нормального барометрического давления 740—760 мм рт. ст. и температуры окружающего воздуха 18—20°С при условной вероятности воспламенения $P_n = 10^{-5}$.

Сплошными линиями обозначены характеристики при быстром размыкании контактов, пунктирными — при замедленном размыкании. Значения токов, расположенных на самой линии

характеристики, соответствуют принятой условной вероятности воспламенения (10^{-5}).

Из приведенных характеристик можно видеть, что при всех значениях напряжения (6, 24 и 60 в) в цепях с индуктивностью от 0,001 до 0,0001 гн воспламеняющие токи при медленном

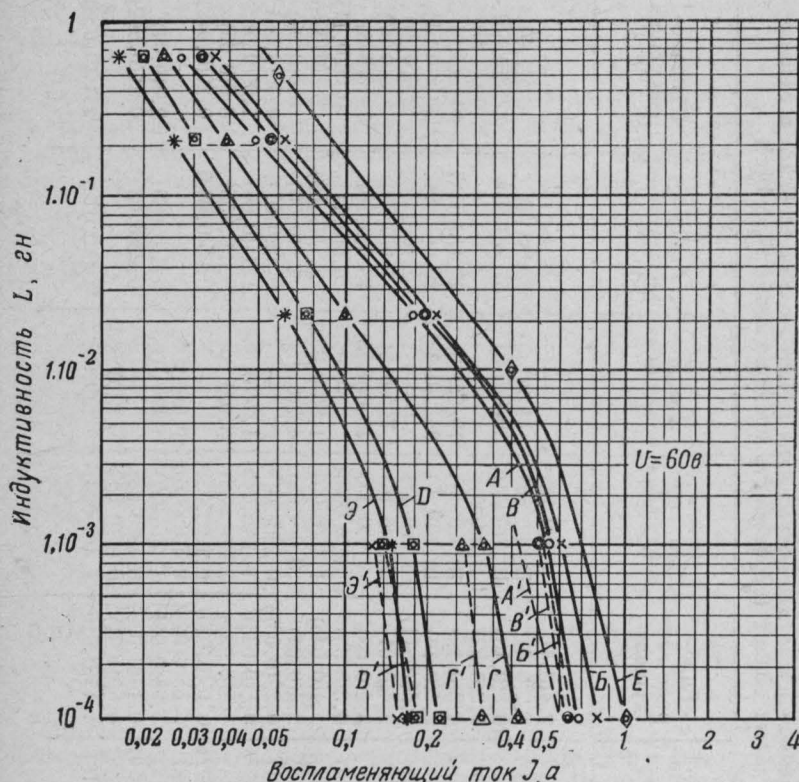


Рис. 26. Экспериментальные характеристики искробезопасности при напряжении постоянного тока 60 в. Вероятность воспламенения $P = 10^{-5}$ для газопаровоздушных смесей:

Э — ацетилен, Д — водород, Г — этилен, А — эфир, Б — пропан, В — ацетон, Е — метан

размыкании контактов значительно меньше по сравнению с токами при тех же величинах индуктивности, но быстром размыкании контактов. Причем в цепях с индуктивностью 0,0001 гн эта разница больше, чем в цепях с индуктивностью 0,001 гн.

При индуктивностях 0,01 гн и больше замедленное размыкание не приводило к уменьшению воспламеняющего тока, что было проверено экспериментально в нескольких смесях.

Минимальные значения воспламеняющих мощностей в $вт$ и токов в a (в скобках) в газо-паровоздушных взрывчатых смесях (вероятность воспламенения $P_n = 10^{-5}$)

Индуктивное сопротивление цепи в $гн$	Напряже-ние в $в$	Ацетилено-воздушная	Водо-родо-воздушная	Этилено-воздушная	Эфиро-воздушная	Ацетилено-воздушная	Пропано-воздушная	Метано-воздушная
0,0001*	6	2,2(0,37)	2,4(0,4)	4,5(0,75)	—	—	—	—
	24	6,5(0,27)	7,2(0,3)	16,3(0,68)	31,2(1,3)	33,6(1,4)	36,0(1,5)	—
	60	9,6(0,16)	10,8(0,18)	19,8(0,33)	36,0(0,6)	37,2(0,62)	37,8(0,63)	60,0(1,0)
0,001*	6	1,2(0,20)	1,3(0,22)	3,0(0,5)	—	—	6,0(1,0)	—
	24	3,8(0,16)	4,3(0,18)	10,8(0,45)	19,2(0,8)	20,4(0,85)	21,6(0,9)	38,5(1,6)
	60	7,8(0,13)	8,4(0,14)	16,2(0,27)	25,2(0,42)	29,4(0,49)	30,6(0,51)	42,0(0,7)
0,01	6	0,54(0,09)	0,66(0,11)	1,1(0,18)	—	2,16(0,36)	2,4(0,4)	—
	24	2,0(0,082)	2,4(0,01)	3,8(0,16)	7,2(0,3)	7,9(0,33)	8,9(0,37)	10,0(0,42)
	60	4,8(0,08)	5,4(0,09)	7,8(0,13)	15,0(0,25)	15,6(0,26)	18,0(0,3)	24,0(0,4)
0,1	6	0,24(0,04)	0,3(0,05)	0,38(0,063)	—	0,6(0,1)	0,66(0,11)	—
	24	0,9(0,037)	1,1(0,045)	1,45(0,06)	1,95(0,082)	2,15(0,09)	2,3(0,095)	3,35(0,14)
	60	2,0(0,033)	2,4(0,04)	3,0(0,05)	4,2(0,07)	4,8(0,08)	5,4(0,09)	7,8(0,13)
0,2	6	0,18(0,031)	0,22(0,037)	0,29(0,049)	—	—	—	—
	24	0,67(0,028)	0,8(0,033)	1,08(0,045)	1,34(0,055)	1,44(0,06)	1,55(0,065)	2,4(0,1)
	60	1,5(0,025)	1,7(0,029)	2,3(0,039)	3,0(0,05)	3,3(0,055)	3,6(0,06)	5,4(0,09)
0,5	6	0,13(0,022)	0,15(0,026)	0,19(0,032)	—	—	—	—
	24	0,48(0,02)	0,55(0,023)	0,70(0,030)	0,9(0,038)	0,26(0,043)	0,29(0,048)	1,55(0,065)
	60	1,1(0,018)	1,25(0,021)	1,5(0,025)	1,9(0,032)	2,1(0,036)	2,4(0,04)	3,6(0,06)
0,65	6	0,11(0,019)	0,14(0,023)	0,18(0,03)	—	—	—	—
	24	0,43(0,018)	0,5(0,021)	0,67(0,028)	0,84(0,035)	0,23(0,039)	0,25(0,042)	—
	60	0,96(0,016)	1,15(0,019)	1,4(0,023)	1,8(0,03)	2,0(0,033)	2,16(0,036)	—

* Величины токов для индуктивностей 0,001 и 0,0001 $гн$ приведены при замедленном размыкании контактов.

Следовательно, чем меньше индуктивность электрической цепи, тем заметнее влияние замедленного размыкания воспламеняющего тока. Поэтому при оценке искробезопасности электрических цепей данное обстоятельство также необходимо учитывать.

Из характеристик можно также видеть, что для воспламенения смеси ацетилена или водорода с воздухом требуется меньшая величина воспламеняющего тока, чем, например, для воспламенения смеси пропана или метана с воздухом. Смеси других исследованных газов или паров горючих жидкостей, по их воспламеняемости от электрической искры, находятся между этими смесями. Минимальные значения воспламеняющих мощностей и токов (при вероятности воспламенения $P_n = 10^{-5}$) сведены в табл. 7, 8 и 9.

Таблица 8

Минимальные значения воспламеняющих мощностей в *вт* и токов в *ма* (в скобках) при напряжении 24 *в* (вероятность воспламенения $P_n = 10^{-5}$)

Индуктивность в <i>гн</i>	Окись этилена	Окись пропилена	Гептан	Пропилен	Бензин Б-70
0,65	0,57(24)	0,66(27,5)	0,77(32)	0,84(35)	0,96(40)
0,22	0,93(39)	1,06(44)	1,2(49)	1,3(55)	1,5(63)
0,1	1,27(53)	1,5(63)	1,7(71)	2,0(83)	2,25(94)
0,01	3,35(140)	4,3(180)	5,3(220)	6,6(275)	8,4(350)
0,001	6,5(270)*	8,4(350)*	11,5(480)*	15,4(640)*	19,5(810)*
—	8,9(370)	11,8(490)	16,0(660)	21(880)	27,5(1150)

Таблица 9

Минимальные значения воспламеняющих мощностей в *вт* и токов в *ма* (в скобках) при напряжении 60 *в* (вероятность воспламенения $P_n = 10^{-5}$)

Смесь	Индуктивность в <i>гн</i>					
	0,65	0,22	0,1	0,01	0,001	0,0001
Окись пропилена	1,3(22)	2,2(37)	3,0(50)	7,8(130)	15,0(250)* 18,5(310)	19,5(325)* 24,5(410)
Бензин (Б-70)	2,1(35)	3,6(60)	5,4(90)	18,0(300)	30,0(500)* 36,0(600)	38,0(630)* 48,0(800)

* Токи при замедленном размыкании контактов.

Из полученных данных видно, что наибольшую безопасно передаваемую мощность можно иметь в цепях, практически не имеющих индуктивности (от 0,001 до 0,0001 *гн*) или имеющих небольшую индуктивность 0,01 *гн*. В цепях же, обладающих индуктивностью 0,1 *гн* и выше, величина безопасно передаваемой мощности значительно меньше. Следовательно, индуктивные цепи представляют большую взрывоопасность, чем безындуктивные.

В сводной табл. 10 приведены величины безопасно передаваемой максимальной мощности в ваттах (вероятность воспламенения $P_n = 10^{-5}$) при напряжении 60 *в* постоянного тока для индуктивных и безындуктивных цепей в нескольких из исследованных смесей.

Таблица 10

Максимальные значения безопасно передаваемой воспламеняющей мощности в *вт* (вероятность воспламенения $P_n = 10^{-5}$)

№ п/п.	Смесь с воздухом	Индуктивность цепи в <i>гн</i>			
		0,0001	0,001	0,1	0,65
1	Ацетилена	9,6	7,8	2,0	0,96
2	Водорода	10,8	8,4	2,4	1,15
3	Окси пропилена	19,5	15,0	3,0	1,3
4	Этилена	19,8	16,2	3,0	1,4
5	Эфира	36,0	25,2	4,2	1,8
6	Ацетона	37,2	29,4	4,8	2,0
7	Пропана	37,8	30,6	5,4	2,16
8	Бензина	38,0	30,0	5,4	2,1
9	Метана*	60,0	42,0	7,8	—

3. КОЭФФИЦИЕНТЫ БЕЗОПАСНОСТИ

При определении допустимых значений токов и мощностей в связи с выполнением практических искробезопасных устройств, очевидно, необходимо учитывать условия работы этих устройств. В этой зависимости следует и принимать тот или иной коэффициент запаса (надежности). Так, например, может быть применена такая электрическая цепь, работа которой не связана с электрическим искрением при нормальных эксплуатационных режимах, но искрение которой возможно лишь при каких-либо повреждениях или неисправностях.

В другом случае может быть применена цепь, искрение которой в эксплуатационных условиях может быть явлением нормальным, но не непрерывным, например при работе сигнального ключа, кнопки и т. п. Могут применяться и такие цепи, работа которых связана с непрерывным искрением, например

* По данным ИГД АН СССР (В. С. Кривченко).

зуммер, контакты реле, звонки и т. д. Поэтому было бы неправильным производить оценку искробезопасности схем, имеющих различный характер работы, применяя при этом одну и ту же условную вероятность воспламенения, иначе говоря, один и тот же коэффициент искробезопасности.

Следовательно, при рассмотрении той или иной схемы с точки зрения оценки ее искробезопасности целесообразно допустимые токи в практических устройствах определять введением определенного коэффициента безопасности в зависимости от условий и режима работы этого устройства.

МАКНИИ в новом разработанном им проекте «Временных правил и норм конструирования электрических систем постоянного и переменного тока с частотой до 50 герц с искробезопасными цепями и методика их испытаний» применительно для шахт, опасных по газу или пыли [19], принимает следующую терминологию.

Воспламеняющий ток — ток, соответствующий вероятности появления взрывов в камере, равный 10^{-3} .

Аварийный воспламеняющий ток — ток, соответствующий вероятности появления взрывов в камере, равный 10^{-4} .

Искробезопасный ток — ток, соответствующий условному значению вероятности, равный 10^{-8} .

Аварийный должен быть меньше воспламеняющего в 1,1 раза. Следовательно, искробезопасный ток меньше воспламеняющего в 2,5 раза. Величина 2,5 является коэффициентом искробезопасности.

Искробезопасность цепи МАКНИИ определяет по следующему признаку: в нормальном, а также в аварийном состоянии ток искрения в цепи не должен превышать значения воспламеняющего тока, уменьшенного в 2,5 раза.

К нормальному состоянию электрической цепи относятся все рабочие режимы системы; к аварийному — режимы, получаемые в результате выполнения любого числа искусственных нарушений в системе, за исключением:

- 1) перехода напряжения высокой стороны трансформатора на низкую;

- 2) замыкания между выводами обмоток высшего и низшего напряжения;

- 3) виткового замыкания в обмотке высшего напряжения трансформатора;

- 4) нарушений, исключающих возможность неправильного подключения к аппаратам и приборам высшей сети;

- 5) нарушений металлических гильз, надеваемых на сердечники электромагнитов или короткозамкнутых обмоток;

- 6) нарушений ограничительных мастичных сопротивлений, исключающих возможность переключения концов сопротивлений.

В английской практике безопасным принимается ток, кото-

рый при 100 размыканиях электрической цепи не дает ни одного воспламенения смеси, но при увеличении на 5% дает одно воспламенение на 100 произведенных в камере искрений. Такой ток соответствует вероятности воспламенения 10^{-2} — 10^{-3} .

В целях большей безопасности нами предложено определять воспламеняющие токи при более низкой вероятности воспламенения, т. е. при 10^{-5} , а допустимые токи определять введением коэффициента искробезопасности в зависимости от условий и режима работы испытываемого устройства. Так, например, для цепей, не искрящих нормально, но искрение в которых может быть вызвано неисправностью или аварией оборудования, применять коэффициент, равный 0,7, что соответствует вероятности воспламенения 10^{-8} ; для нормально, но не часто искрящих устройств (сигнальные ключи, кнопки и т. п.)—0,5, что соответствует вероятности воспламенения 10^{-10} .

Очевидно, что принятие того или иного коэффициента безопасности является условным. Возможно, что для более обоснованного решения этого вопроса целесообразна постановка соответствующих исследований. Установленные исследованиями величины безопасных передаваемых токов и мощностей, даже с учетом введения коэффициентов безопасности, перекрывают электрические параметры различных слаботочных устройств (см. табл. 6, 7 и 8). Доказательством этому являются следующие испытанные образцы некоторых приборов и аппаратов, которые были присланы в ЦНИИПО из различных организаций:

1. Сигнализатор аварии резервуаров. Источник питания — напряжением 6 в постоянного тока. Индуктивность цепи — 1,07 гн. Наибольший ток в цепи — 23 ма. Безопасен для применения в среде бензиновых паров.

2. Контактный сигнализатор. Источник питания — напряжением 1,5 в. Максимальный ток искрения — 1,5—3 ма. Безопасен для применения в среде бензиновых паров.

3. Электротермометрическая установка для измерения температур взрывоопасных сред. Источник питания — напряжением 1,5 в. Максимальный ток в цепи — 40 ма. Индуктивность цепи — 6 гн. Безопасен для применения в среде водорода.

4. Переносный газоанализатор типа ПГФ2-ВЗГ. Источник питания — напряжением 4,5 в, постоянного тока; ток искрения — 0,85 ма. Безопасен в среде бензина.

5. Мегометр типа М1102. Номинальное напряжение — 460 в, ток — 0,55 ма. Безопасен для применения в средах бензина, пропана, метана.

6. Электрический датчик расходомера газов. Источник питания — напряжением 12 в, максимальный ток искрения — 25 ма. Безопасен для применения в среде этилена, пропана, метана.

7. Датчик (термометр сопротивления) типа ЭТП-45

электронного автоматического самопишущего прибора. Напряжение источника питания—1,5 в, ток—10 ма. Безопасен для применения в среде водорода.

8. Индукционный датчик измерителя давления взрывоопасной среды типа ИД-5; источник питания—напряжением 1,1 в переменного тока. Наибольший ток в цепи—30 ма. Индуктивность цепи—0,15—0,2 гн. Безопасен для применения в среде водорода.

9. Индукционный датчик измерителя давления ИД-7. Источник питания—напряжением 0,9 в переменного тока. Наибольший ток—35 ма. Индуктивность цепи—0,05 гн. Безопасен для применения в среде водорода.

10. Радиоактивный измеритель уровня в закрытой емкости жидкости, газа, сыпучих тел. Напряжение на датчике—380 в постоянного тока при силе тока 0,5—1 ма. Индуктивность цепи—0,003 гн. Безопасен для применения в среде водорода.

Следовательно, полученные величины токов и мощностей указывают на полную возможность практического применения различных электрических слаботочных устройств автоматизации, сигнализации, связи, дистанционного управления не только в среде метана, но и в других, более опасных по воспламенению от электрического искрения средах. Этот вывод имеет большое практическое значение, поскольку он открывает новые области безопасного применения электрической энергии в тех производственных условиях, где раньше использование электрической энергии осложнялось применением тяжелых бронированных оболочек или вообще запрещалось.

Искробезопасные цепи могут найти применение не только как средство сигнализации, связи, дистанционного управления, но и как безопасные вспомогательные цепи для обеспечения взрывозащиты сильноточных устройств, например в схемах опережающего отключения, блокировок и в системах автоматической газовой защиты при помощи газовых реле. Таким образом, полученные данные открывают новые возможности для внедрения средств автоматизации и телемеханики во взрывоопасные помещения химической, нефтяной, нефтеперерабатывающей, нефтегазодобывающей, лакокрасочной и других отраслей промышленности, что представляет, несомненно, большое практическое значение.

4. ПРИМЕНЕНИЕ ШУНТОВ

Искробезопасность электрических цепей может быть значительно увеличена благодаря применению искрогасящих шунтов. Такой шунт включается параллельно индуктивному элементу электрической цепи. При размыкании тока в основной цепи образуется замкнутый контур: индуктивное сопротивление

ние — шунт, в котором гасится какая-то часть энергии, исчезающего магнитного поля индуктивного элемента. Следовательно, при размыкании (искрении) цепи энергия этого искрения уменьшается, тем самым снижается ее воспламеняющая способность. Благодаря этому представляется возможным увеличить величину размыкаемого тока без уменьшения при этом искробезопасности данной цепи.

По литературным данным [6], известно, что для этих целей могут быть применены шунты в виде различных сопротивлений: проволочных, карбид-кремниевых (нелинейные), детекторных. Наиболее эффективными в смысле возможности увеличения передаваемой мощности являются детекторные шунты (селеновые, ДГЦ). Менее эффективны купроксные шунты и шунты из омических сопротивлений. Положительной стороной детекторного шунта, кроме того, является то, что он не нагружает цепь дополнительной нагрузкой, как проволочный и, частично, карбид-кремниевый шунты.

Применять конденсаторы в качестве шунтирующего устройства не рекомендуется [4] по той причине, что возможность различия условий искрообразования в практических цепях может привести, наоборот, к уменьшению воспламеняющего тока, а следовательно, увеличить опасность искрения такой цепи.

Эффект от применения шунтов тем выше, чем больше индуктивность цепи. Так, например, по данным [6], безопасно передаваемая мощность в метано-воздушной смеси при индуктивности 2,01 *гн*, напряжении 200 *в* составила 7,2 *вт*. При подключении детекторного шунта с селеновым элементом мощность увеличилась в девять раз. При этом отмечается, что при соответствующем подборе шунта можно достигнуть увеличения воспламеняющего тока даже в несколько десятков раз [4].

При проведении автором сравнительных испытаний в эфир-воздушной смеси при индуктивности 0,16 *гн*, напряжении постоянного тока 48 *в*, без шунтирования индуктивности, воспламеняющий ток был получен 0,11 *а* (вероятность воспламенения — $3 \cdot 10^{-1}$). При включении шунта в виде шайбы из селена ток воспламенения увеличился до 0,95 *а* (вероятность воспламенения — $1,8 \cdot 10^{-1}$).

Аналогичное увеличение воспламеняющего тока было получено при исследованиях в водородо-воздушной смеси. Ток воспламенения без включения шунта в цепь с индуктивностью 0,22 *гн* при напряжении постоянного тока 60 *в* составил 0,04 *а*. При включении такого же шунта ток увеличился до 0,4 *а*, т. е. в 10 раз. Вероятность воспламенения была одинаковой.

Было также проверено действие нового вида детекторных шунтов типа ДГЦ (диоды германиевые). При напряжении 60 *в* постоянного тока и индуктивности цепи 1 *гн* воспламеняющий ток в водородо-воздушной смеси без применения шунта и

размыкания цепи между контактами (см. рис. 12) составил 0,015 а. При включении шунта в виде двух параллельно соединенных ДГЦ-22 ток воспламенения составил 0,11 а, т. е. увеличился более чем в семь раз. Из полученных результатов видно, что даже при случайно выбранной величине шунта воспламеняющий ток увеличивается в 7—10 раз.

На рис. 27 приведены примерные схемы включения искрогасящих шунтов [6].

Схема (рис. 27, а) не может быть рекомендована, так как обрыв в цепи шунта вызовет увеличение энергии искры.

Схемы включения шунтов (рис. 27, б и в) могут быть рекомендованы для цепей как постоянного, так и переменного тока.

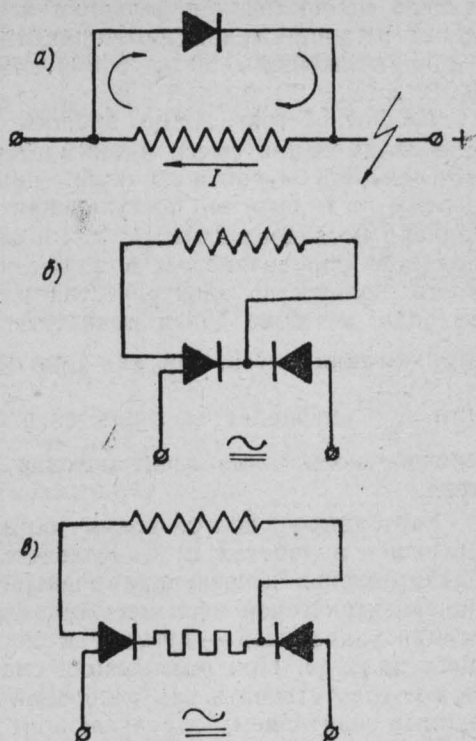


Рис. 27. Схемы включения искрогасящих шунтов.

5. ЭНЕРГИЯ ИСКРЫ И ПРЕДЕЛ ЗАЖИГАНИЯ

Торнтон, определяя предел воспламенения для рудничного газа при размыкании индуктивной цепи и при разряде конденсатора, пришел к выводу, что в первом случае эта энергия может быть вычислена как энергия исчезающего магнитного поля по формуле $\frac{LI^2}{2}$ (дж), где L — индуктивность размыкаемой цепи в гн, I — величина размыкаемого тока в а, а энергия при разряде конденсатора — по формуле $\frac{CU^2}{2}$ (дж), где C — емкость конденсатора в фарадах; U — напряжение на обкладках конденсатора в в.

При исследованиях Торнтоном было установлено, что в

индуктивных цепях энергия исчезающего магнитного поля $\frac{LI^2}{2}$ далеко не постоянная величина и в значительной степени зависит от напряжения источника тока. Например, при изменении напряжения с 50 до 500 в энергия уменьшалась с 0,2 до 0,012 мдж.

Данное обстоятельство явилось поводом предположить, что в воспламенении смеси принимает участие не только энергия исчезающего магнитного поля (при размыкании индуктивных цепей), но и энергия, поступающая от источника тока [1, 6, 8]. Однако исследователям [1, 2, 10] не удалось установить, что является определяющим в зажигании смеси: энергия, мощность, количество электричества или другие характеристики разряда, а также найти количественно энергию, участвующую в зажигании смеси, так как при подсчете по формулам $\frac{LI^2}{2}$

или $\frac{CU^2}{2}$ определяется лишь энергия либо исчезающего магнитного поля, либо электрическая энергия разряда конденсатора.

Этот вопрос, долгое время оставшийся открытым, был разрешен в работах В. С. Кравченко. Им было установлено, что мгновенно исчезающая электрическая искра при размыкании электрической цепи с током, как правило, состоит из двух стадий: начальной — дуговой и последующей — стадии тлеющего разряда. При размыкании слабых токов дуговая стадия может отсутствовать. На основании этого было определено, что единым критерием, определяющим воспламеняющую способность электрических искр при размыкании как индуктивных, так и практически безиндуктивных (безреактивных) цепей является энергия дуговой стадии разряда.

При размыкании индуктивных цепей энергия зажигания (дуговая стадия) составляет примерно от $\frac{1}{2}$ до $\frac{1}{3}$ от общей энергии, рассеиваемой в искре. Энергия же тлеющего разряда не способна воспламенить смесь. Одновременно В. С. Кравченко была определена роль энергии, поступающей в искру от источника тока, которая увеличивается с уменьшением индуктивности размыкаемой цепи. Дана расчетная формула для определения энергии дуговой стадии разряда в зависимости от параметров электрической цепи

$$A = \frac{LI^2}{2} - \frac{LI_1^2}{2} + \frac{(I - I_1)(U + 2I_1R)}{6} \tau_1, \quad (4)$$

где: I — размыкаемый ток в а;
 I_1 — ток обрыва дуги в а;
 U — напряжение источника тока в в;
 R — сопротивление цепи в ом;

L — индуктивность цепи в гн ;

τ_1 — продолжительность дуговой стадии разряда в мк/сек .

Первые два члена уравнения $\frac{LI^2}{2} - \frac{LI_1^2}{2}$ определяют энергию, поступившую в дуговой разряд из магнитного поля, а третий член $\frac{(I - I_1) I_1 (U + 2IR)}{6} \tau_1$ — энергию, поступившую от источника тока.

Были сформулированы и условия, при которых возможно воспламенение смеси (условия зажигания). Так, например, при искрении смешанных (индуктивных и безреактивных) электрических цепей воспламенение смеси произойдет, если

$$\frac{(1-a)^2}{12a} UI\tau_m \geq A_{\text{мин}}, \quad (5)$$

$$a = \frac{1}{6 \frac{\tau}{\tau_m} + 4}; \quad I = \frac{U}{R},$$

где: $\tau \frac{L}{R}$ — постоянная времени;

τ_m — максимальная продолжительность электрической дуги при размыкании цепи.

В безреактивных цепях

$$0,1875 \cdot UI\tau_m \geq A_{\text{мин}}. \quad (6)$$

Таким образом, впервые была установлена математическая связь между воспламеняющей способностью искрения и параметрами электрической цепи [8].

Необходимо отметить, что определение минимальной величины воспламеняющей энергии $A_{\text{мин}}$ (предел зажигания) представляет главное затруднение, которое заключается в вероятностном характере зажигания смеси электрической искрой.

Известно, что чем больше выполняется опытных искрений во взрывчатой смеси, тем меньшее значение воспламеняющего тока удастся обнаружить. Так, например, в начальной стадии исследований В. С. Кравченко удалось получить воспламенение смеси при вероятности 10^{-4} и не удалось получить при вероятности 10^{-5} . Более поздними экспериментами было обнаружено воспламенение при крайне малой вероятности 10^{-7} (одно воспламенение на 10 млн. искрений).

Предел ли это воспламенения (нулевая вероятность) или факт отсутствия воспламенения объясняется несовершенством опытов (затупление контактов еще не установлено) [8].

Следовательно, отмечает автор, нет резкой грани между воспламеняющим и невоспламеняющим токами, а имеется

плавный переход от токов воспламенения, которые дают 100% воспламенения (вероятность, равная 1) к малым токам, при которых воспламенение случайно и маловероятно. По-видимому, существует величина тока, практически не воспламеняющая смесь, однако точное ее определение встречает большие экспериментальные затруднения. Следовательно, как говорит В. С. Кравченко, понятие о пределе (границе) воспламенения, очевидно, следует считать условным и относить этот предел к определенной, заранее выбранной вероятности воспламенения, например 10^{-5} .

Так, для смеси с содержанием 8,5% метана в воздухе и при вероятности воспламенения 10^{-5} предел зажигания был определен равным 1,1 мдж, причем как среднее арифметическое ряда значений, полученных для нескольких случаев зажигания.

Ранее Д. Морганом предел зажигания 8,5-процентной метано-воздушной смеси от искры разряда конденсатора был определен в 2 мдж; Б. Наугольниковым, К. Скрынниковым и Д. Маляр — 1,6 мдж, М. Бланком, Б. Льюисом, Г. Эльбе — 0,5 мдж [8].

Очевидно, что знание минимальной энергии зажигания для других смесей, отличных от метановых, представляет не только теоретический интерес, но и большое практическое значение, поскольку позволяет заранее оценить искробезопасность электрических цепей в какой-либо еще не исследованной газо-паровоздушной взрывчатой смеси.

По формуле, предложенной В. С. Кравченко и преобразованной из формулы (1)

$$I = \sqrt{\left(\frac{U\tau}{6L}\right)^2 + \frac{2A}{L}} - \frac{U\tau_1}{6L}, \quad (7)$$

был произведен подсчет минимального значения энергии зажигания и токов для исследованных смесей с воздухом, а именно: смеси ацетилена (9,25%), водорода (20%), этилена (7%) и пропана (6%) (см. рис. 25, 26). Подсчет энергии для каждой смеси был произведен по экспериментальным значениям воспламеняющих токов, отнесенных к вероятности воспламенения 10^{-5} , для напряжения источника тока 6, 24 и 60 в и диапазона индуктивностей от 0,0001 до 0,65 гн.

Продолжительность искрения τ_1 определялась расчетом по двум экспериментальным точкам характеристик искробезопасности для индуктивностей 0,65 и 0,5 гн, а также по полученным осциллограммам размыкания тока. Полученные из расчета средние значения $\tau_1 = 80 \div 100$ мк/сек были очень близкими к наблюдаемому времени τ_1 , полученному из осциллограмм ($75 \div 120$ мк/сек) для условия размыкания электрических цепей

при медных облуженных контактах и скорости размыкания больше 1 м/сек.

Приблизительная величина энергии зажигания («предел» зажигания) для данных смесей определилась: ацетилена — 0,1 мдж; водорода — 0,15 мдж; этилена — 0,25 мдж; гептана — 0,32 мдж; пропилена — 0,37 мдж; эфира (серного) — 0,4 мдж; ацетона — 0,5 мдж; бензина (Б-70) — 0,52 мдж; пропана — 0,55 мдж.

В табл. 11, 12, 13, 14 приведены значения токов в ма, полученные из опыта и расчетом по формуле (7) для четырех смесей. Как видно из таблиц, для значительного большинства точек характеристик искробезопасности опытные значения токов сходятся с расчетными. Отклонение по токам колеблется в небольших пределах: для ацетилена — до 8,5% и только для четырех точек — 19, 27 и 40%. Для водорода — до 13% (одна

Таблица 11

Ацетилен

$A = 0,1$ мдж; $\tau_1 = 100$ мк/сек; I ма

Индуктивность цепи в гн	60 в			24 в			6 в		
	$I_{оп}$	$I_{рас}$	% откл.	$I_{оп}$	$I_{рас}$	% откл.	$I_{оп}$	$I_{рас}$	% откл.
0,65	16	15,8	-1,2	18	16,7	-7	19	17	-10
0,5	18	18	0	20	19,2	-4	22	20	-9
0,2	25	23,8	-4,7	28	29	+3,5	31	31	0
0,1	33	36	+9	37	40	+8	40	43	+7,5
0,01	80	73	-8,5	85	107	+26			
0,001	130	95	-27	470	243	+40			
0,0001	160	130	-19	270	320	+18			

Таблица 12

Водород

$A = 0,15$ мдж; $\tau_1 = 100$ мк/сек; I ма

Индуктивность цепи в гн	60 в			24 в			6 в		
	$I_{оп}$	$I_{рас}$	% откл.	$I_{оп}$	$I_{рас}$	% откл.	$I_{оп}$	$I_{рас}$	% откл.
0,65	19	20	+5	21	21	0	23	21,6	-6
0,5	21	22,5	+5	23	23,7	+3	26	24,3	-6,5
0,2	29	33	+13	33	36	+9	37	38	+3
0,1	40	44	+10	45	50	+11	50	53	+6
0,01	90	100	+10	105	130	+24			
0,001	140	140	0	180	200	+11			
0,0001	180	170	-5,5	300	360	+20			

Таблица 13

Этилен

 $A = 0,25$ мдж; $\tau_1 = 100$ мк/сек; I ма

Индуктив- ность цепи в гн	60 в			24 в			6 в		
	$I_{оп}$	$I_{рас}$	% отк.	$I_{оп}$	$I_{рас}$	% отк.	$I_{оп}$	$I_{рас}$	% отк.
0,65	23	25	9	28	27	3,5	30	27,6	8
0,5	25	29	16	30	31	3,0	32	31,8	0,6
0,2	39	45	15	45	48	6,5	49	50	2
0,1	50	61	22	60	66	10	63	70	11
0,01	130	120	7,5	160	180	12,5	18	21	17
0,001	270	225	12	450	410	9	500	600	12
0,0001	330	250	24	680	583	14	1600	1500	6,5

Таблица 14

Пропан

 $A = 0,55$ мдж; $\tau_1 = 100$ мк/сек; I ма

Индуктив- ность цепи в гн	60 в			24 в			6 в		
	$I_{оп}$	$I_{рас}$	% отк.	$I_{оп}$	$I_{рас}$	% отк.	$I_{оп}$	$I_{рас}$	% отк.
0,65	36	39	8	—	—	—	42	41	2
0,5	40	45	12	—	—	—	48	47	2
0,2	60	69	15	65	72	11	80	74	7,5
0,1	90	95	5,5	95	100	5	110	104	5,5
0,01	300	246	18	370	290	21	400	336	16
0,001	510	449	11,5	900	720	20	1000	954	4,5
0,0001	650	540	17	1500	1200	20	—	—	—

точка) и для двух точек — 20 и 24%; для этилена — до 17% и для двух точек — 22, 24%; пропана — до 18% и для трех точек 20, 20, 21%. Полученная разница по токам, особенно для ацетиленов (две точки — 27 и 40%), объясняется различными условиями зажигания, а также, возможно, и некоторой неточностью эксперимента. Необходимо отметить, что указанная разница главным образом наблюдается при искрении в цепях с малыми индуктивностями и особенно при небольшом напряжении источника тока (6 в). Объяснением этому может служить значительная сложность анализа искрового разряда при таких параметрах электрической цепи.

В заключение можно констатировать, что найденная В. С. Кравченко связь между воспламеняющей способностью искрения и параметрами электрической цепи (напряжением, величиной размыкаемого тока, индуктивностью и безреактивным сопротивлением) справедлива не только для метано-воздушных смесей, но и для других, отличных от метановых, газопаровоздушных взрывчатых смесей.

Данное обстоятельство имеет практическое значение, поскольку исключает необходимость во всех случаях производить оценку искробезопасности цепей только на основании результатов длительных опытов. Теперь такая оценка может быть произведена также и расчетным путем.

ГЛАВА VI

МЕТОД УСКОРЕННОЙ ОЦЕНКИ ОПАСНОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ИСКРЕНИЯ

Несмотря на большую практическую ценность получаемых результатов исследований, существующий метод оценки опасности электрического искрения требует очень большого времени. Достаточно сказать, что для проведения таких исследований только в одной среде при трех значениях напряжений требовалось не менее полугода. Известно, что взрывоопасных газо-паровоздушных смесей может быть очень большое количество. Только смесей, имеющих промышленное значение, насчитывается несколько десятков. Очевидно, что существующий метод потребует немало лет для получения данных по искробезопасности еще не исследованных смесей.

В связи с этим возникла необходимость разработать такой метод, который позволял бы без снижения ранее полученной точности производить оценку в более короткое время. Накопленный опыт исследований в этой области, а также анализ результатов позволили предложить новый ускоренный метод оценки искробезопасности. Возможность создания такого метода основывается на следующих, выявленных в процессе исследований закономерностях:

1. Полученные зависимости вероятности воспламенения от изменения величины воспламеняющего тока во всех 10 исследованных смесях (включая метан) указывают, что вероятностный характер воспламенения (зажигания) смеси электрической искрой размыкания действителен не только для среды метана, но и для всех других газо-паровоздушных смесей и не зависит от различия физико-химических свойств каждой смеси.

2. Каждая из исследованных смесей на графике вероятностей имеет свое определенное местоположение по отношению к другим смесям, что определяет способность данной смеси к воспламенению от электрической искры.

Приведенное очевидно из рассмотрения графиков вероятности воспламенения (см. рис. 23).

3. Кривые вероятностей воспламенения для всех смесей практически параллельны между собой, т. е. имеют почти одинаковый угол наклона их к оси абсцисс (табл. 15).

Таблица 15

**Величина угла наклона вероятностей кривой различных
газо-паровоздушных смесей**

Смесь с воздухом	Угол наклона	Смесь с воздухом	Угол наклона
Ацетилена	86°34'	Гептана	86°50'
Водорода	86°34'	Эфира	87°34'
Окси этилена	87°25'	Ацетона	87°43'
Окси пропилена	87°00'	Пропана	87°47'
Этилена	86°38'	Метана*	86°18'

Как видно из приведенного, разница в углах наклона незначительна и колеблется в пределах от 16' до 1° 29', что объясняется трудностью воспроизведения совершенно одинаковых условий искрения и неустойчивостью характера зажигания смеси электрической искрой. Поскольку разница в углах наклона получена небольшая, можно считать, что кривые вероятностей и для других смесей будут находиться в пределах найденных значений углов. Поэтому можно принять среднее значение угла и считать его постоянным для кривых вероятностей всех газо-паровоздушных смесей.

Средняя величина угла наклона составляет

$$\alpha_{cp} = \frac{\Sigma \alpha_{on}}{a} = \frac{870^{\circ} 23'}{10} = 87^{\circ} 2,3' \approx 87^{\circ} 2',$$

где: $\Sigma \alpha_{on}$ — сумма углов наклона для всех исследованных 10 смесей;

a — количество исследованных смесей.

Величина отклонения найденного угла наклона для каждой смеси от среднего значения приведена в табл. 15.

Таблица 16

Смесь с воздухом	Угол наклона		$\Delta \alpha$ в мин.	$\Delta \alpha^2$
	α_{on}	α_{cp}		
Ацетилена	86° 34'	87° 02'	+28	784
Водорода	86° 34'	87° 02'	+28	784
Окси этилена	87° 25'	87° 02'	+23	529
Окси пропилена	87° 00'	87° 02'	+2	4
Этилена	86° 38'	87° 02'	+24	576
Гептана	86° 50'	87° 02'	+12	144
Эфира	87° 34'	87° 02'	—32	1024
Ацетона	87° 43'	87° 02'	—41	1681
Пропана	87° 47'	87° 02'	—45	2025
Метана	86° 18'	87° 02'	+44	1936
$\Sigma \alpha \text{ опыт} = 870^{\circ} 23'$			$\Sigma \Delta \alpha^2 = 9487$	

* По данным ИГД АН СССР (В. С. Кравченко).

В результате подсчета определен показатель точности

$$П = \frac{b \cdot 100}{a_{cp}} = 0,19\%,$$

где

$$b = \pm \frac{\sigma}{\sqrt{a}} \quad \text{и} \quad \sigma = \pm \sqrt{\frac{\Sigma \Delta a^2}{a-1}}.$$

Приведенный расчет показывает, что принимать среднее значение величины угла наклона возможно, поскольку получаемая при этом точность вполне достаточная. С принятием средней величины угла наклона необходимо было выяснить величину отклонения опытных значений воспламеняющих токов от расчетных. В табл. 17 приведены эти значения токов в исследованных смесях (при $P=10^{-5}$), соответствующие экспериментальному и среднему углам наклона, и разница (отклонение) между ними.

Таблица 17

Величины отклонения воспламеняющих токов, полученных из опыта путем расчета для среднего угла наклона кривых

Смесь с воздухом	Электрические параметры		Воспламеняющий ток в <i>ма</i> при $P=10^{-5}$ и углах наклона		Разница в токах ΔI в <i>ма</i>	Откло- нение тока в %
	<i>U</i> в в	<i>L</i> в гн	α опытн.	α средн. 87°02'		
Ацетилена	24	0,22	28	29	+1	3,5
Водорода	24	0,22	32	33	+1	3,0
Окси этилена . .	24	0,22	38	35	-3	8,5
Этилена	24	0,22	46	48	+2	4,0
Окси пропилена	24	0,22	45	45	0	0
Гептана	24	0,22	49	50	+1	2,0
Эфира	24	0,064	110	114	+4	3,5
Эфира	24	0,22	55	54,3	-0,7	1,3
Ацетона	24	0,22	62	57	-5	8,6
Пропана	24	0,22	64	57	-7	12,0
Метана	200	0,237	22	24,5	+2,5	10,0

Из приведенного видно, что по величине токов (подсчитанных, исходя из среднего значения угла наклона кривых) по сравнению с токами, полученными экспериментальным путем, также получена небольшая разница (в пределах 5—7 *ма*), вполне приемлемая для практики. Отсюда можно сделать вывод, что для определения минимального значения воспламеняющего тока в какой-либо еще неисследованной смеси нет необходимости строить вероятностные кривые $P=f(I)$ по нескольким экспериментальным точкам, а достаточно опреде-

лить координаты лишь одной экспериментальной точки. Затем провести через эту точку прямую под углом $87^{\circ}02'$ до пересечения ее с осью абсцисс. Место такого пересечения укажет величину тока, соответствующую выбранной условной вероятности воспламенения, например 10^{-5} .

Определение тока может быть произведено также по формуле (2)

$$I_n = I_1 \left(\frac{P_n}{P_1} \right)^{\frac{1}{\lg \alpha}}.$$

4. При анализе характеристик искробезопасности, полученных для всех исследованных смесей (включая и метан), установлено, что они имеют одинаковый характер расположения их на графике зависимости $I=f(L)$. Характеристики отличаются тем, что при напряжении 6 и 24 в они имеют вид прямой (см. рис. 24 и 25), а при напряжении, большем 24 в, в частности 60 в, — вид кривой (см. рис. 26). Кроме этого отличия для каждой смеси и в зависимости от рода смеси и напряжения, характеристики имеют не общий, как кривые вероятностей, а свой определенный угол наклона относительно оси абсцисс. Причем при напряжении 6 и 24 в на всем своем протяжении характеристики имеют один угол наклона, а при напряжении 60 в — два угла; один в интервале индуктивностей от 0,65 до 0,01 гн, а второй — от 0,001 до 0,0001 гн.

Установлено также, что имеется математическая связь между воспламеняющим током, индуктивностью и углом наклона характеристик. Для пояснения этой связи на рис. 28 для примера приведены характеристики смеси водорода с воздухом (левая линия) и смеси этилена с воздухом (правая линия) при напряжении 24 в. Средней пунктирной линией $I-I$ изображена характеристика какой-то новой, неисследованной паро- или газозоудушной смеси. Очевидно, что, несмотря на одинаковый характер расположения характеристик, угол наклона каждой из них будет различным. Тангенс угла наклона характеристики может быть представлен как равенство

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{b}{a} = \frac{\lg L_1 - \lg L_2}{\lg I_1 - \lg I_2} = \frac{\lg \frac{L_1}{L_2}}{\lg \frac{I_1}{I_2}}. \quad (8)$$

Произведя преобразование этого выражения, получим уравнение

$$\frac{I_2}{I_1} = \left(\frac{L_2}{L_1} \right)^{-\frac{1}{\operatorname{tg} \beta}}. \quad (9)$$

Следовательно, когда известна величина воспламеняющего тока, например I_1 , соответствующего индуктивности L_1 , а для

другой индуктивности L_2 ток I_2 не известен, его можно определить расчетом, не производя при этом большого количества опытов, по приведенной формуле (9)

$$I_2 = I_1 \left(\frac{L_2}{L_1} \right)^{-\frac{1}{\operatorname{tg} \beta}},$$

где: I_2 — искомый ток при индуктивности L_2 ;
 I_1 — известная величина тока, полученная из опыта для индуктивности L_1 ;
 L_1 и L_2 — индуктивности электрической цепи, для которых строится характеристика искробезопасности;
 β — угол наклона характеристики данной смеси.

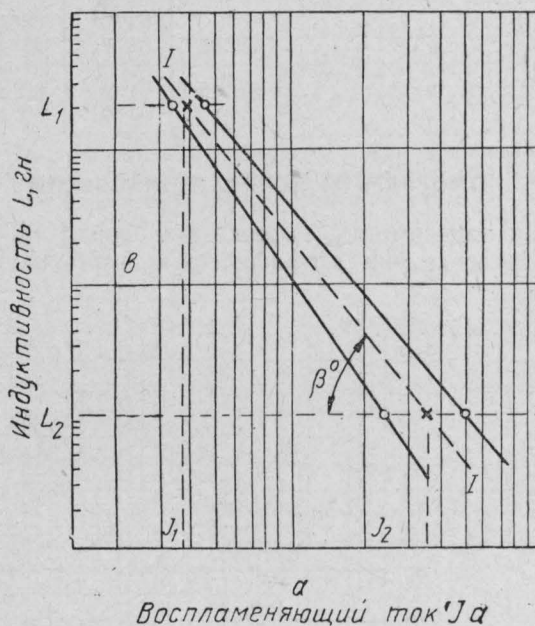


Рис. 28. График, поясняющий связь между током, индуктивностью и углом наклона β линии характеристики.

Углы наклона характеристик каждой исследованной смеси при трех значениях напряжения 6, 24 и 60 в, подсчитанные по результатам опытных данных I и L по формуле (8), сведены в табл. 18.

Углы наклона характеристик искробезопасности при

 $U = 6, 24 \text{ и } 60 \text{ в}$

Смесь с воздухом	Напряжения источника тока в в			
	6	24	60	
	от 0,65 до 0,0001 гн		от 0,65 до 0,01 гн	от 0,001 до 0,0001 гн
Ацетилена	68° 54'	70° 10'	70° 20'	86° 00'
Водорода	67° 12'	68° 48'	68° 54'	85° 20'
Окси этилена	—	67° 05'	—	—
Этилена	64° 56'	65° 45'	66° 36'	83° 25'
Окси пропилена	—	65° 48'	—	—
Гептана	—	64° 27'	—	—
Пропилена	—	63° 02'	—	—
Эфира	—	62° 24'	66° 00'	82° 12'
Ацетона	62° 00'	62° 12'	65° 45'	—
Бензина (Б-70)	—	61° 54'	—	—
Пропана	61° 30'	61° 36'	62° 42'	81° 40'
Метана	—	60° 48'	60° 00'	81° 10'

НОМОГРАММЫ ИСКРОБЕЗОПАСНОСТИ

Найденная зависимость, выраженная формулой (9), на рис. 29, 30, 31 представлена в графическом изображении, в виде

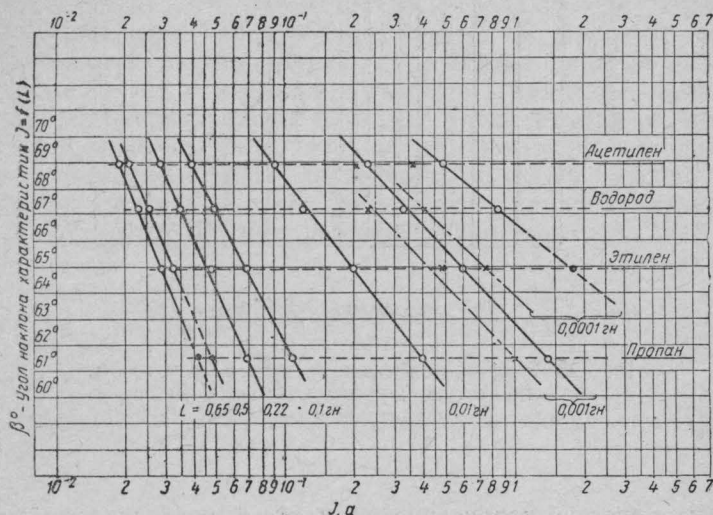


Рис. 29. Номограммы искробезопасности для напряжения 6 в постоянного тока. Диапазон индуктивностей — от 0,0001 до 0,65 гн. Вероятность воспламенения $P = 10^{-5}$.

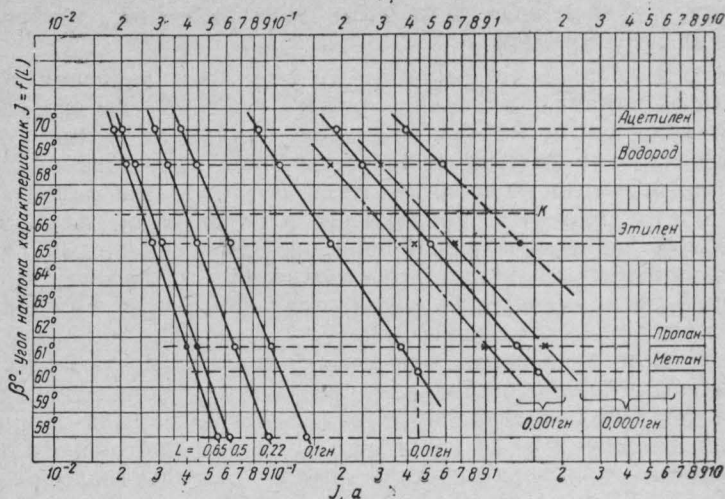


Рис. 30. Номограммы искробезопасности для напряжения 24 в постоянного тока. Диапазон индуктивностей — от 0,0001 до 0,65 гн. Вероятность воспламенения $P = 10^{-4}$.

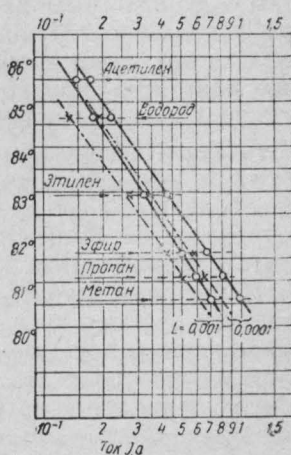
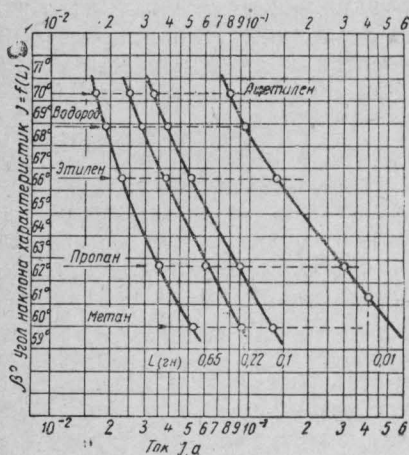


Рис. 31. Номограммы искробезопасности для напряжения 60 в постоянного тока. Диапазон индуктивностей — от 0,0001 до 0,65 гн. Вероятность воспламенения $P = 10^{-5}$.

номограмм. По этим номограммам можно определить величину воспламеняющего тока, соответствующего заданным индуктивности и напряжению, не только расчетным путем, но и графически, не производя при этом экспериментов, требующих значительного времени.

По оси абсцисс этих номограмм отложены значения токов, а по оси ординат — значения углов наклона характеристик искробезопасности $I=f(L)$. Каждая наклонная линия номограмм построена по токам, полученным для исследованных смесей (при вероятности воспламенения $P=10^{-5}$), для одной величины индуктивности и напряжения электрической цепи. Если наклонные линии номограмм пересечь горизонтальными линиями, то полученные точки пересечения будут соответствовать величине воспламеняющих токов, полученных для каждой индуктивности в исследованной смеси. Очевидно, что такие линии для не исследованных еще смесей в зависимости от их воспламеняющей способности находятся где-то в зоне этих линий.

На рис. 29 представлена такая номограмма для напряжения 6 в; на рис. 30 — 24 в; на рис. 31 — 60 в постоянного тока, применительно к электрическим цепям с индуктивностью от 0,0001 до 0,65 гн. Для напряжения 6 и 24 в линии номограмм так же, как и характеристики искробезопасности для этих напряжений, прямолинейные. Для напряжения 60 в характеристики искробезопасности прямолинейны лишь в диапазоне индуктивностей от 0,65 до 0,01 гн и от 0,001 до 0,0001 гн. В связи с этим и номограммы для этого напряжения и указанных участков индуктивностей построены раздельно. Линии номограмм, обозначенные точка — тире, относятся к замедленному размыканию контактов, при котором для индуктивностей от 0,001 гн и меньше воспламеняющие токи снижаются.

Допустим, необходимо построить характеристику искробезопасности для какой-то еще не исследованной взрывчатой газо-паровоздушной смеси при напряжении 24 в. Предварительно определяется концентрация паров горючего или газа в смеси, при которой смесь является наиболее легко воспламеняемой. В крайнем случае, если состав такой смеси не известен, она может составлять на 30—40% больше стехиометрического соотношения для данной смеси.

Можно предполагать, что получаемые результаты в такой смеси не приведут к грубым ошибкам; в то же время данная смесь может быть быстро оценена по ее воспламеняющей способности от электрической искры.

Во взрывной камере, заполняемой такой смесью, производится размыкание (искрение), предположим, при индуктивности 0,22 гн. Ток воспламенения устанавливается в размыкаемой цепи из расчета, чтобы вероятность воспламенения была в пределах $1 \cdot 10^{-1}$ — $1,5 \cdot 10^{-1}$.

После 30 воспламенений (взрывов) смеси в камере (соглас-

но методике исследования) положим, при токе 0,55 а, было зафиксировано по счетчику 1200 искрений. Следовательно, вероятность (частота) воспламенения составляет

$$P = \frac{m-1}{n-1} = \frac{30-1}{1200-1} = 0,0242 = 2,42 \cdot 10^{-2},$$

Подставив значения в формулу (2)

$$I_n = 0,055 \left(\frac{10^{-5}}{2,42 \cdot 10^{-2}} \right)^{0,0518},$$

получим $I_n \cong 0,038$ а.

Перенеся полученное значение тока на линию номограммы, соответствующую индуктивности 0,22 гн и напряжению 24 в, проводим из этой точки горизонтальную линию до пересечения ее с линиями других индуктивностей. Точки пересечения укажут величину тока, соответствующую каждой из приведенных на номограмме индуктивностей. По значениям этих токов можно быстро построить характеристику искробезопасности для выбранного напряжения в пределах значений индуктивности от 0,0001 до 0,65 гн. Этот пример графического определения токов (по номограмме) приведен для смеси окиси этилена с воздухом, обозначенной на номограмме (см. рис. 30) и характеристике (см. рис. 25) буквой К.

Определение тока, соответствующего вероятности $P_n = 10^{-5}$, может быть упрощено, если при экспериментах был получен ток с вероятностью воспламенения

$$P = \frac{1}{10} + \frac{1}{15}, \text{ т. е. } (P-1) 10^{-1} + 1,5 \cdot 10^{-1}.$$

В этом случае подсчет тока по формуле (2) можно не производить, а применить коэффициент, равный 0,62 (соответствующий снижению тока при угле наклона кривых, равному $87^{\circ}02'$), как неоднократно проверенный на исследованных смесях.

Построение характеристик при напряжении 60 в отличается лишь тем, что оно производится по экспериментально найденным значениям токов не для одной какой-либо индуктивности, а для двух из указанных на номограмме индуктивностей, например для 0,65 и 0,001 гн (см. стр. 68). Определение тока для заданной величины индуктивности и напряжения может быть произведено не только по номограммам, но и путем расчета по формуле (9). Например, на основании опытов было установлено, что при напряжении 24 в и индуктивности $L_1 = 0,65$ гн воспламеняющий ток при $P = 10^{-5}$ составил $I_1 = 0,032$ а. Необходимо определить ток при индуктивности $L_2 = 0,001$ гн. Находим по номограмме (см. рис. 30) угол наклона характеристики, соответствующей данному напряжению

Отклонение опытных значений токов от расчетных для ранее исследованных смесей

Индуктивность цепи в Ω	Напряжение в в	Ацетилен				Водород				Этилен				Пропан				
		Опытн.	Расчетн.	Отклон.		Опытн.	Расчетн.	Отклон.		Опытн.	Расчетн.	Отклон.		Опытн.	Расчетн.	Отклон.		
				ма	%			ма	%			ма	%			ма	%	
0,65	{	24	18	-1	5,5	21	21	0	—	28	27	-1	3,5	—	—	—	—	—
		60	16	-0,5	3,0	19	18,5	-0,5	0,25	23	23	0	—	—	—	—	—	—
0,22	{	24	28	-1,5	5	32	33	+1	3	45	46	+1	2	64	—	—	—	—
		60	25	0	0	29	28,7	-0,3	1	38	36,7	-1,3	3,5	60	61	+1	1,6	2
0,1	{	24	37	-2	5	44	43	-1	2	63	64	+1	1,5	98	10,0	+2	9	5,4
		60	33	+0,2	0,6	40	39,1	-0,9	2,2	51	51,6	+0,6	1,2	90	98	+8	20	0,3
0,01	{	24	82	-2	2,3	105	100	-5	4,7	180	180	0	—	370	350	+20	2,4	1,5
		60	80	-4,5	5,5	95	95	0	0	140	139	+1	0,7	300	301	+1	—	4,8
0,001	{	24	190	-5	2,6	250	225	+5	2,0	510	520	+10	2	1250	1220	-30	—	—
		60	145	0	0	180	180	0	0	330	325	+5	1,5	600	609	+9	—	—
0,0001	{	24	400	+20	5	580	620	+40	7	—	—	—	—	—	—	—	—	—
		60	170	+2	1,2	220	218	-2	0,9	420	428	+8	1,9	800	840	+40	—	—

тока. Этот угол составляет $64^{\circ}00'$ ($tg \beta = 2,050$). Подставив известные значения в формулу (9), получим

$$I_2 = 0,032 \left(\frac{0,001}{0,65} \right)^{\frac{1}{2,05}} = 0,75 \text{ а.}$$

По номограмме этот ток составляет примерно 0,745 а.

В результате проведенных расчетов для исследованных смесей установлено, что получаемая равница (отклонение) в величине воспламеняющего тока, полученного из опыта и путем расчета или по номограммам, составляет всего 4—5,5%. Такое отклонение не может иметь практического значения (см. табл. 19—20). Возможность применения этого метода была проверена не только на ранее исследованных смесях с воздухом (ацетилена, водорода, этилена, эфира, пропана, ацетона, метана) при напряжении 6, 24, 60 в, но и на других, позже исследованных смесях: окиси этилена, окиси пропилена, гептана, пропилена, бензина Б-70.

ВЫВОДЫ

По результатам исследований

Полученные результаты исследований указывают на возможность применения слабых электрических устройств (приборов автоматики, сигнализации, связи и т. п.) в искробезопасном исполнении не только в угольной промышленности (среда метана), но и в других, более легко воспламеняемых средах (ацетилен, водород, окись этилена и др.), т. е. на предприятиях народ-

Таблица 20

Отклонение опытных значений токов от расчетных для вновь исследованных смесей

Индуктивность цепи в в	Напряжение в в	Окись этилена			Окись пропилена			Гептан			Пропилен			Бензин Б-70		
		опытн.	расчетн.	отклон. ма	опытн.	расчетн.	отклон. ма	опытн.	расчетн.	отклон. ма	опытн.	расчетн.	отклон. ма	опытн.	расчетн.	отклон. ма
0,22	24	38	37	-1	45	43,6	-1,4	49	50,9	+1,9	55	56,2	+1,2	63	64,5	+1,5
0,1	24	53	52,5	-0,5	63	63	0	71	72	+1	83	82,7	-0,3	94	96	+2
0,01	24	140	140	0	180	177	-3	220	216	-4	275	277	+2	350	330	-20
0,001	24	370	374	+4	490	498	+8	660	650	-10	880	867	-13	1150	1130	-20
				2,6			3,0			3,9			2,2			2,4
				0,9			—			1,4			0,36			2,1
				—			1,6			1,8			0,7			0,6
				1,1			1,6			1,5			1,5			1,7

ного хозяйства, где применение электрической энергии связано с опасностью такого воспламенения (химическая, нефтяная, нефтеперерабатывающая, нефтегазодобывающая, лакокрасочная и др.). Установленные исследованиями мощности и токи, которые можно безопасно передавать в ряде случаев, перекрывают потребности цепей связи, сигнализации и тому подобных устройств.

Этот вывод имеет большое практическое значение. Он открывает возможность безопасного применения электрической энергии в производственных условиях, где раньше использование электричества осложнялось применением тяжелых бронированных оболочек или вообще считалось недопустимым.

Данные, полученные по искробезопасным параметрам, могут явиться руководящим материалом не только при оценке опасности искрения электрических устройств, но и при конструировании новых искробезопасных систем.

Результаты исследований позволили дополнить «Правила устройства электроустановок» (Госэнергоиздат) при их переиздании в 1957 г. нормативными данными по искробезопасным параметрам для трех сред (водород, эфир, пропан). В настоящее время эти данные дополнены еще по шести средам, а также расширена область их применения по напряжению до 60 в постоянного тока.

Результаты исследований по определению искробезопасности в средах, отличных от метана, получены в ЦНИИПО впервые.

По имеющимся сведениям, за рубежом к исследованию в таких средах приступили лишь недавно.

По методу ускоренной оценки искробезопасности

Предложенный метод оценки искробезопасности по сравнению с существующими до сих пор отличается простотой и достаточной точностью результатов. Разница в токах, получаемых из опыта и по расчету, колеблется в пределах 4—5,5%, что на практике не имеет значения. По существующим до этого методам, для оценки искробезопасности при любом значении индуктивности необходимо было определять 3—4 экспериментальные точки. Учитывая, что характеристики искробезопасности строятся для 4—5 значений индуктивностей, при экспериментах, следовательно, всего необходимо получить 12—20 точек, для определения которых необходимо произвести до миллиона искрений.

По новому методу требуется значительно меньше времени как для построения кривых вероятности воспламенения, так и характеристик искробезопасности. Такое построение для нап-

ряжения до 24 в и всего диапазона индуктивностей от 0,0001 до 0,65 гн возможно произвести лишь при наличии одной экспериментальной точки, для определения которой достаточно произвести порядка 1000 искрений. Для напряжений выше 24 в (в частности, для 60 в) для построения характеристик достаточно получить две экспериментальные точки.

ЛИТЕРАТУРА

1. П. П. Пироцкий. Искробезопасные системы электрической сигнализации и связи и воспламенение рудничного газа. ОНТИ ДНТБУ НКТП 1937 г.
2. Морган Д. Принципы зажигания. Машгиз, 1947 г.
3. Лейбов Р. М. Электрооборудование для шахт, опасных по газу или пыли. Сталинское обл. книжно-газетное изд., 1948 г.
4. Кравченко В. С. Обеспечение искробезопасности электрических цепей слабого тока. Углетехиздат, 1948 г.
5. Кравченко В. С. Сборник «Рудничная аэрология и безопасность труда в шахтах». Углетехиздат, 1949 г.
6. Кравченко В. С. Открытое электрическое искрение в воспламеняющейся рудничной атмосфере. Журн. «Электричество» № 2, 1950 г.
7. Кравченко В. С. Воспламеняющая способность электрического искрения. Журн. «Электричество» № 9, 1952 г.
8. Кравченко В. С. Основы теории рудничных искробезопасных систем. Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора техн. наук. Изд. АН СССР, 1953 г.
9. Кравченко В. С. Воспламеняющая способность электрических разрядов при размыкании цепей тока промышленной, звуковой и ультразвуковой частот. Журн. «Электричество» № 1, 1954 г.
10. Ковалев П. Ф. Принципы взрывобезопасности рудничного электрооборудования. Углетехиздат, 1951 г.
11. Ихно А. Г. Новый вид защиты от воспламенения рудничного газа электрическими искрами размыкания. Бюллетень МакНИИ № 17, 1948 г.
12. Озерной М. И. Вопросы новой техники подземного горного электрооборудования. Углетехиздат, 1954 г.
13. Фурманов Б. М. Искробезопасность электрических устройств, работающих во взрывоопасной атмосфере. Углетехиздат, 1955 г.
14. Кравченко В. С. и Фетисов П. А. Искробезопасность электрооборудования в атмосфере взрывоопасных смесей. Журн. «Электричество» № 12, 1956 г.
15. Фетисов П. А. Пожаро-взрывоопасность электрического искрения. Журн. «Пожарное дело» № 3, 1958 г.
16. Бражник Н. И. и Скрынников К. А. Журн. технической физики № 4, 1934 г.
17. Итин А. В. Экспериментальное исследование воспламенения рудничного газа искрами, возникающими в электрических цепях различной частоты. Известия Днепропетровского ордена Трудового Красного Знамени горного института им. Артема, т. XXIII, 1955 г.
18. Фетисов П. А. Метод ускоренной оценки опасности электрического искрения. Журн. «Электричество» № 11, 1958 г.

19. Проект Временных Правил и Нормы конструирования электрических систем постоянного и переменного тока с частотой до 50 *гц* с искробезопасными цепями и методика их испытаний. Изд. МакНИИ, Донбасс, 1957 г.

20. Годжелло М. Г., Демидов П. Г., Джалалов Е. М., Коршак З. В. и Рябов И. В. Легковоспламеняющиеся и горючие жидкости. Справочник. Изд. МКХ РСФСР, 1956 г.

21. Изучение воспламенения взрывчатых смесей посредством искр. Журн. по электрохимии и прикладной физической химии № 1, 1951 г. (переводная статья).

22. Allsop G., Hartwell F. I., Guenault E. M., Baker A. R., Safety in Mines Research № 106, 1947 г.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Стр.

Введение	3
Глава I. Краткий обзор литературы	5
Глава II. Методика исследований	11
Глава III. Экспериментальная установка	18
1. Взрывная камера для исследования газо-паровоздушных смесей	19
2. Взрывная камера для исследования пылевых смесей	23
3. Механизмы искрения	24
4. Сравнительная оценка работы механизмов искрения	28
5. Привод механизма искрения	32
6. Электрическая схема установки	33
Глава IV. Экспериментальная часть	34
1. Определение состава смеси	34
2. Влияние скорости размыкания	38
3. Влияние материала контактов	41
Глава V. Результаты исследований	43
1. Кривые вероятностей воспламенения	43
2. Характеристики искробезопасности	46
3. Коэффициенты безопасности	52
4. Применение шунтов	55
5. Энергия искры и предел зажигания	57
Глава VI. Метод ускоренной оценки опасности электрического иск- рения	63
Номограммы искробезопасности	68
Выводы	73
Литература	76

Петр Афиногенович Фетисов

ВЗРЫВООПАСНОСТЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ИСКРЕНИЯ
В ГАЗОВЫХ СМЕСЯХ

Редактор *А. Л. Шестаков*

Редактор Издательства *М. А. Оточева*

Техн. редактор *Н. П. Салазков*

Корректор *О. Г. Каперская*

Сдано в набор 14/IV 1959 г.

Подписано к печати 24/VII 1959 г.

Формат бум. 60×92¹/₁₆

Печ. л. 5.

Уч.-изд. л. 5,30

Л43998 Изд. № 468

Тираж 6000

Цена 2 р. 65 к.

Заказ 1662

Типография изд-ва Министерства коммунального хозяйства РСФСР,
г. Перово, ул. Плющева, 22.

ОПЕЧАТКИ

Страница	Строка	Напечатано	Следует читать
28	22 снизу	минимального	номинального
38	Таблица 6, колонка 6	цифра 5,0 ⁵ относится к этилену	цифра 5,0 ⁵ относится к пропилену
38	То же	цифра 4,5 ⁵ относится к окиси пропилена	цифра 4,5 ⁵ относится к пропану
39	Сверху 14, 17, 25	I_L	e_L
44	14 снизу (подпись под рисунком 23)	246 в	24 в