

## Выпуск № 2

### Свойства SF<sub>6</sub> и его использование в коммутационном оборудовании среднего и высокого напряжения



**Д. КОХ**

Дипломированный инженер Электротехнического института (IEG), г. Гренобль, 1979.

В том же году присоединился к группе Merlin Gerin, сначала как технический менеджер по выключателям среднего напряжения, а затем как руководитель, ответственный за конструирование.

С 1995 является ответственным за стандартизацию, технологии и окружающую среду.

Также отвечает за развитие компании в Восточной Европе.

---



# Свойства SF<sub>6</sub> и его использование в коммутационном оборудовании среднего и высокого напряжения

В данном разделе представлены общие свойства газа SF<sub>6</sub> и его побочных продуктов. Приводится краткая история использования элегаза в коммутационной аппаратуре. Обсуждается влияние SF<sub>6</sub> на окружающую среду. Дается руководство для работы с элегазом и элегазовым оборудованием при нормальных и аномальных условиях эксплуатации.

Содержание данного документа основано на техническом отчете Международной электротехнической комиссии МЭК 1634 «Оборудование высокого напряжения - использование элегаза (SF<sub>6</sub>) в аппаратах высокого напряжения».

## Содержание

<b>1 Введение</b>	1.1. Краткая история использования SF <sub>6</sub>	<b>стр. 4</b>
	1.2. Производство SF <sub>6</sub>	стр. 5
	1.3. Другие виды применения SF <sub>6</sub>	стр. 5
<b>2 Физические и химические свойства SF<sub>6</sub></b>	2.1. Физические свойства	<b>стр. 6</b>
	2.2. Химические свойства	стр. 8
<b>3 Обзор элегазового коммутационного оборудования</b>	3.1. Коммутационное оборудование среднего напряжения (СН) и высокого напряжения (ВН)	<b>стр. 11</b>
	3.2. Потребление SF <sub>6</sub> и количество коммутационной аппаратуры	стр. 12
	3.3. Опыт EDF: 20 лет применения SF <sub>6</sub> в распределительных устройствах среднего напряжения	стр. 13
	3.4. Тенденции развития	стр. 13
<b>4 Использование и обращение с газом SF<sub>6</sub> в коммутационном оборудовании</b>	4.1. Заполнение новым газом SF <sub>6</sub>	<b>стр. 14</b>
	4.2. Утечка газа SF <sub>6</sub> из элегазового оборудования	стр. 15
	4.3. Обслуживание элегазового оборудования	стр. 15
	4.4. Окончание срока службы элегазового оборудования	стр. 16
	4.5. Нештатные ситуации	стр. 16
	4.6. SF <sub>6</sub> и окружающая среда	стр. 19
<b>5 Заключение</b>		<b>стр. 21</b>
<b>Приложение 1: Список литературы</b>		<b>стр. 22</b>

# 1. Введение

## 1.1. Краткая история использования SF<sub>6</sub>

Синтез гексафторида серы впервые был произведен в лабораториях Faculté de Pharmacie в Париже в 1900 г. учеными Муасаном и Лебо. Фтор, полученный электролизом, вступал во взаимодействие с серой, и в результате сильной экзотермической реакции получался достаточно устойчивый газ. Со временем были определены физические и химические свойства газа, опубликованные Придо (1906 г.), Шлумбом и Гемблом (1930 г.), Клеммом и Хенкелем (1932-35 г.г.) и Естом и Клауссоном (1933 г.).

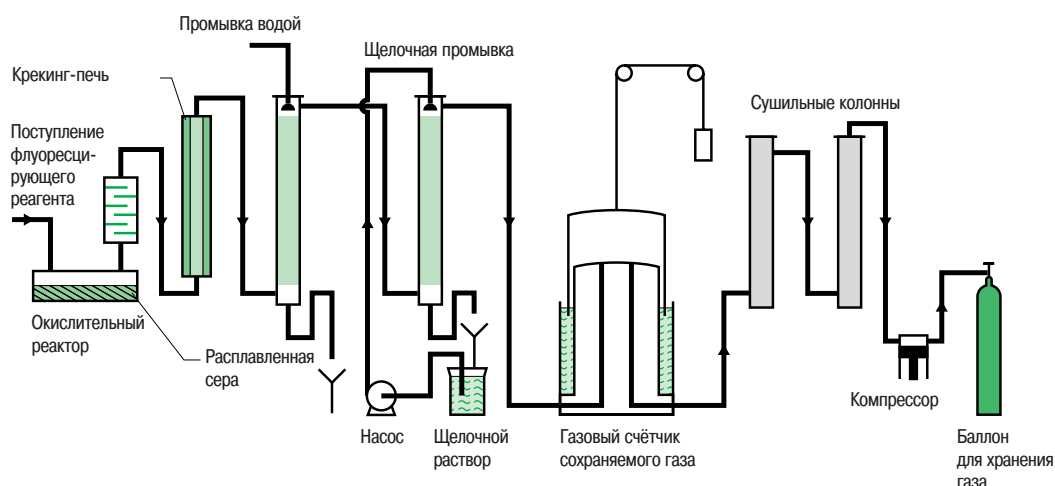
В их работах особенное внимание уделялось химическим и диэлектрическим свойствам газа. Первое исследование для целей промышленного применения было проведено компанией General Electric в 1937 г. Результаты этого исследования показали, что газ можно использовать в качестве изоляционной среды в электроэнергетике. В 1939 Томсон-Хьюстон запатентовал принцип применения газа SF<sub>6</sub> для изоляции кабелей и конденсаторов. После Второй мировой войны различные публикации и способы применения газа стали быстро появляться один за другим:

- 1947 г.: работа по использованию элегаза для изоляции трансформаторов;
- 1948 г.: развитие промышленного производства SF<sub>6</sub> в США в корпорацией Allied Chemical и компанией Pennsalt;
- 1960 г.: организация серийного производства SF<sub>6</sub> для строительства электростанций в США и Европе, совпа-

дающая с появлением первых элегазовых выключателей и коммутационных аппаратов высокого и сверхвысокого напряжения.

В компании Merlin Gerin исследовательская работа по использованию газа SF<sub>6</sub> для изоляции и отключения цепей была начата примерно в 1955 г. Это совпадает с появлением первых промышленных изделий в США. Впервые промышленное применение газа было осуществлено компанией Merlin Gerin для сверхвысокого напряжения, затем для устройств среднего напряжения:

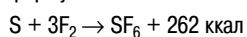
- 1964 г.: первая подстанция с элегазовой изоляцией заказана EDF и введена в эксплуатацию в районе Парижа в 1966 г.
- 1967 г.: FA-выключатель был введен в эксплуатацию и постепенно заменил оборудование на сжатом воздухе, которое прочно занимало свое положение во Франции и других странах в течение предыдущих 25 лет.
- 1971 г.: изменения в потребностях промышленности заставили компанию Merlin Gerin начать производство элегазового выключателя среднего напряжения Fluarc.
- В последнее время газ SF<sub>6</sub> был принят для использования в коммутационной аппаратуре среднего напряжения, ячейках SM6, контакторах и автоматических выключателях, охватывая все потребности распределения электроэнергии.



**Рис. 1** : Процесс производства SF<sub>6</sub> путем непосредственного соединения. Цепь очистки необходима для получения газа высокой степени чистоты. Качество газа SF<sub>6</sub> для поставки определяется Руководством Международной электротехнической комиссии МЭК 376, в котором определены допустимые концентрации примесей

## 1.2. Производство SF<sub>6</sub>

Единственный используемый в настоящее время промышленный процесс производства использует синтез гексафторида серы, при котором фтор, полученный при электролизе, взаимодействует с серой согласно экзотермической реакции, выраженной формулой:



В течение этой реакции формируется некоторое количество других фторидов серы, например, SF<sub>4</sub>, SF<sub>2</sub>, S<sub>2</sub>F<sub>2</sub>, S<sub>2</sub>F<sub>10</sub>, а так же примесей из-за присутствия влаги, воздуха и угольных анодов, используемых для электролиза фтора. Эти побочные продукты удаляются различными способами очистки (см. [рис. 1](#)).

## 1.3. Другие виды применения SF<sub>6</sub>

Уникальные свойства SF<sub>6</sub> привели к его использованию в различных отраслях науки и промышленности, например:

- медицинская сфера: электрическая изоляция в медицинском оборудовании (в рентгеновских установках) или в хирургии;
- электрическая изоляция в научном оборудовании (электронные микроскопы, ускорители частиц, например, генератор Ван дер Графа);

- акустическая изоляция в оконных стеклопакетах;
- газ для отслеживания потока воздуха в вентиляционных системах (например, в шахтах) или в верхних слоях атмосферы;
- газ для обнаружения утечки в герметичных системах;
- создание специальной атмосферы при металлургической обработке алюминия и магния или для военных целей.

## 2. Физические и химические свойства SF<sub>6</sub>

### 2.1. Физические свойства

SF<sub>6</sub> - один из самых тяжелых известных газов (см. рис. 2). Его плотность при 20°C и 0,1 МПа (т.е. при давлении, равном одной атмосфере) равна 6,139 кг/м<sup>3</sup>, почти в

Плотность	6,14 кг/м <sup>3</sup>
Теплопроводность	0,0136 Вт/м К <sup>1</sup>
Критическая точка:	
■ Температура	45,55 °C
■ Плотность	730 кг/м <sup>3</sup>
■ Давление	3,78 МПа
Скорость распространения звука	136 м/с
Показатель преломления	1,000783
Теплота образования	-1221,66 кДж/моль
Удельная теплоёмкость	96,6 Дж/моль·К

**Рис. 2** : Основные физические свойства SF<sub>6</sub> при атмосферном давлении и температуре 25 °C

пять раз выше, чем у воздуха. Его молекулярная масса составляет 146,06. Он является бесцветным и не имеет запаха. SF<sub>6</sub> может находиться в жидком состоянии только при повышенном давлении.

#### Уравнение состояния

Газ гексафторида серы, имеющий уравнение состояния по типу Битти-Бриджмена, до температуры, приблизительно равной 1200 °K, ведет себя как идеальный газ:

$$pv^2 = R T (v + b) - a,$$

где:

$p$  = давление (Па)

$v$  = объем (м<sup>3</sup>/моль)

$R$  = константа идеального газа (8,3143 Дж/моль·К)

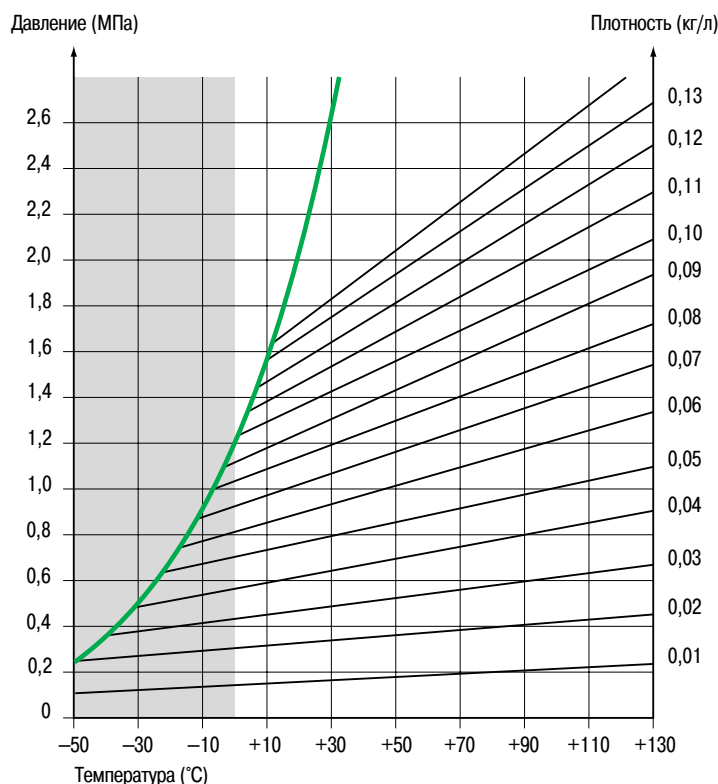
$T$  = температура Кельвина (К)

$a = 15,78 \times 10^{-6} (1 - 0,1062 \times 10^{-3} v^{-1})$

$b = 0,366 \times 10^{-3} (1 - 0,1236 \times 10^{-3} v^{-1})$

#### Зависимость давления от температуры

Зависимость давления от температуры линейная и относительно небольшая, в диапазоне рабочих температур от -25 до +50 °C (см. рис. 3).



**Рис. 3** : Кривая давления пара и линии эквивалентной плотности газа SF<sub>6</sub>

### Удельная теплоёмкость

Объемная удельная теплоёмкость SF<sub>6</sub> в 3,7 раз больше, чем у воздуха. Это имеет важные последствия для уменьшения эффектов нагрева в электрическом оборудовании.

### Теплопроводность

Теплопроводность SF<sub>6</sub> ниже, чем у воздуха, но его полная теплоотдача, в особенности, если учитывается конвекция, очень хорошая, как водорода и гелия, и выше, чем у воздуха. При высоких температурах кривая теплопроводности SF<sub>6</sub> (см. рис. 4) демонстрирует одно из исключительных качеств этого газа, которое позволяет использовать его для гашения дуги путем теплопередачи. Пик теплопроводности соответствует температуре распада молекулы SF<sub>6</sub> при 2100 - 2500 °К. В процессе распада поглощается значительное количество теплоты, испускаемой при преобразовании молекул на периферии дуги, ускоряя теплообмен между горячими и более прохладными областями.

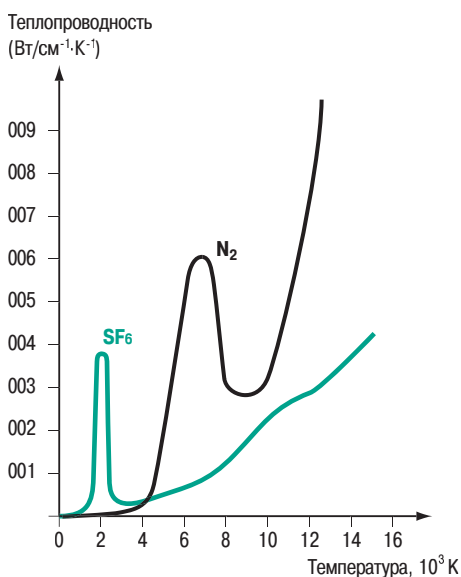
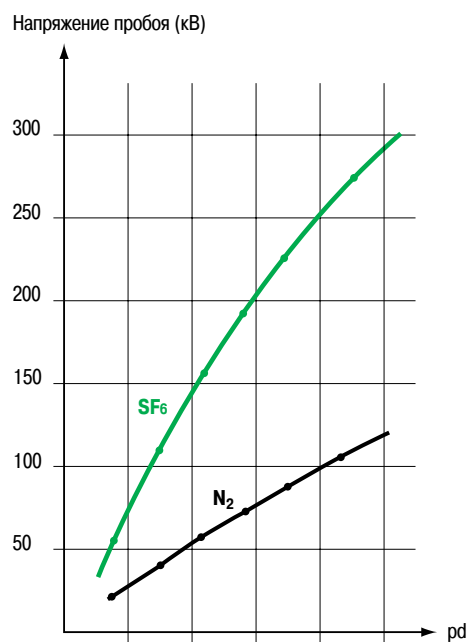


Рис. 4 : Теплопроводность SF<sub>6</sub> и азота

### Электрические свойства

Превосходные диэлектрические свойства SF<sub>6</sub> происходят вследствие электроотрицательного типа его молекулы. Газ имеет явную тенденцию к захвату свободных электронов, образуя малоподвижные тяжелые ионы, вследствие чего развитие электронных лавин становится очень трудным.

Диэлектрическая прочность SF<sub>6</sub> приблизительно в 2,5 раз выше, чем у воздуха при тех же условиях. Преимущество SF<sub>6</sub> как диэлектрика по сравнению с азотом хорошо заметно на кривой (см. рис. 5).



Произведение pd :

p: давление (МПа)

d: расстояние между электродами (10<sup>-3</sup> м)

Рис. 5 : Напряжение пробоя как функция произведения pd между двумя сферами диаметром 5 см

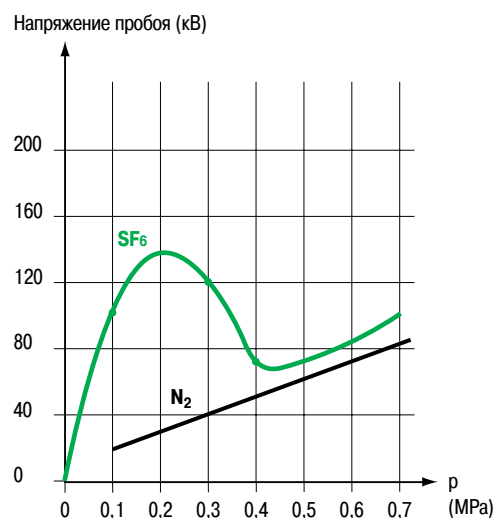


Рис. 6 : Напряжение пробоя как функция давления для неоднородного электрического поля

Для неоднородных полей (см. рис. 6) максимальное напряжение пробоя получается при давлении приблизительно равном 0,2 МПа.

Вследствие низкой температуры распада и высокой энергии распада SF<sub>6</sub> является идеальным газом для гашения дуги.

Когда электрическая дуга охлаждается в SF<sub>6</sub>, она остается проводящей до относительно низкой температуры, таким образом, минимизируя прерывание тока перед переходом через ноль, и тем самым, избегая высоких перенапряжений.

На рис. 7 приведены основные электрические характеристики SF<sub>6</sub>.

#### Звуковые характеристики

Скорость звука в SF<sub>6</sub> в три раза меньше скорости звука в воздухе, вследствие чего SF<sub>6</sub> является хорошим акустическим изолятором.

Поле пробоя в зависимости от давления	89 V m <sup>-1</sup> Pa <sup>-1</sup>
Относительная диэлектрическая постоянная при 25 °C и 1 баре абс. давл.	1,00204
Коэффициент потерь (tan δ) при 25 °C и 1 баре абс. давления	< 2 x 10 <sup>-7</sup>
Коэффициент ионизации	α=A p E/(p - B) α: (m <sup>-1</sup> ) E: (V m <sup>-1</sup> ) p: (Pa) A=2,8 x 10 <sup>-2</sup> V <sup>2</sup> B=89 V m <sup>-1</sup> Pa <sup>-1</sup>

Рис. 7 : Основные электрические характеристики SF<sub>6</sub>

## 2.2. Химические свойства

Гексафторид серы полностью удовлетворяет требованиям к валентности молекулы серы. Его молекулярная структура представлена восьмигранником с молекулами фтора на каждой вершине. Эффективный диаметр столкновения молекулы SF<sub>6</sub> – 4,77 Е. Шесть связей являются ковалентными, что объясняет исключительную стабильность этого соединения.

- SF<sub>6</sub> можно нагреть без его распада до 500 °C в отсутствие каталитических металлов.
- SF<sub>6</sub> не воспламеняется.
- Водород, хлор и кислород не оказывают никакого воздействия на этот газ.
- SF<sub>6</sub> не растворяется в воде.
- Кислоты не оказывают никакого воздействия на этот газ.

В чистом состоянии SF<sub>6</sub> нетоксичен, что регулярно подтверждается на новом газе перед его поставкой. Для проверки мышей помещают на 24 часа в атмосферу, состоящую на 80% из SF<sub>6</sub> и на 20% - из кислорода (биологическое исследование, рекомендованное Международной электротехнической комиссией МЭК 376).

#### Продукты разложения дуги

В электрической дуге температура может достигать 15000 °K, и малая часть SF<sub>6</sub> при этом распадается. Продукты распада формируются при следующих условиях:

- электрическая дуга, сформированная при расхождении контактов, обычно состоящих из сплавов на основе вольфрама, меди и никеля, содержащих остаточные количества кислорода и водорода;
- такие примеси в SF<sub>6</sub>, как воздух, CF<sub>4</sub> и водяной пар;
- изолирующие компоненты, включающие пластмассы на основе углерода, водорода и диоксида кремния;
- другие металлические или неметаллические материалы, из которых произведено оборудование.

Вышесказанное объясняет, почему твердые и газообразные продукты распада содержат (помимо фтора и серы) такие элементы как углерод, кремний, кислород, водород, вольфрам, медь и т.д. Принципиальные газообразные побочные продукты, идентифицированные в лабораториях, исследующих данный вопрос, объединяющие хроматографию газовой фазы с масс-спектрометрией, следующие:

- фтористоводородная кислота - HF;
- диоксид углерода - CO<sub>2</sub>;
- диоксид серы - SO<sub>2</sub>;
- тетрафторид углерода - CF<sub>4</sub>;
- тетрафторид кремния - SiF<sub>4</sub>;
- фторид тионила - SOF<sub>2</sub>;
- фторид двуокиси серы - SO<sub>2</sub>F<sub>2</sub>;
- дисерный декафторид - SF<sub>4</sub>;
- тетрафторид серы - S<sub>2</sub>F<sub>10</sub>.

Некоторые из этих побочных продуктов могут быть токсичными, но большинство из них очень легко адсорбируется такими материалами как активированный оксид алюминия или молекулярные сетки. Некоторые побочные продукты также образуются в чрезвычайно малых количествах (S<sub>2</sub>F<sub>10</sub>).

Если адсорбент (молекулярная сетка или активированный оксид алюминия) присутствует в оборудовании в достаточном количестве, то уровень коррозии из-за продуктов распада SF<sub>6</sub> (фтористоводородной кислоты, в частности) является очень невысоким, а то и вообще незначительным. Причина этого в том, что адсорбенты действуют настолько быстро и эффективно, что коррозионные газы не успевают реагировать с другими присутствующими материалами.

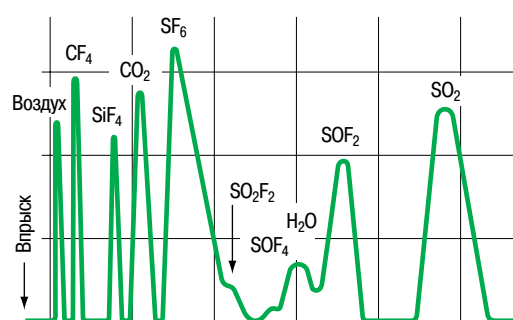
Однако, чтобы избежать любого риска, компания Merlin Gerin запретила использование некоторых материалов и составляющих с признаками распада, после длительных испытаний с высоким уровнем загрязнения при отсутствии адсорбентов.



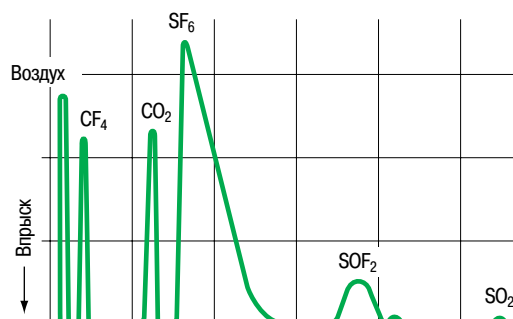
### Анализ газа, взятого из оборудования

Многочисленные аспекты можно изучить, проведя анализ газа и его продуктов распада. Здесь мы рассмотрим только влияние адсорбентов, а именно молекулярной сетки. На хроматограмме **a** на **рис. 8** показаны результаты анализа газа, взятого с опытного контакта без использования какого-либо адсорбента. На хроматограмме **b** на **рис. 8** показаны результаты анализа газа, взятого с такого же контакта, подвергнутого таким же электрическим воздействиям, но с использованием молекулярной сетки. Таблица на **рис. 9** позволяет сравнить количества газообразных продуктов распада для этих двух случаев. Эффективность применения адсорбента очевидна.

**a - Хроматограмма без адсорбента**



**b - Хроматограмма с адсорбентом (молекулярной сеткой)**



**Рис. 8** : Анализ газов, взятых из оборудования

### Санитарно-гигиенические характеристики чистого SF<sub>6</sub>

Чистый SF<sub>6</sub> нетоксичен и биологически нейтрален. Испытания, проведенные на животных, показали, что при наличии газа SF<sub>6</sub> в концентрации до 80% и 20% кислорода неблагоприятные эффекты отсутствуют.

Газ	Без адсорбента (%)	С адсорбентом (молекулярной сеткой) (%)
Air	0,17	0,03
CF <sub>4</sub>	2,83	2,80
SiF <sub>4</sub>	2,88	0,25
CO <sub>2</sub>	0,24	–
SF <sub>6</sub>	остаток	остаток
SO <sub>2</sub> F <sub>2</sub>	0,12	–
SOF <sub>2</sub>	3,95	небольшое кол-во
H <sub>2</sub> O + HF	0,20	0,05
SO <sub>2</sub>	2,90	небольшое кол-во

**Рис. 9** : Результаты анализа SF<sub>6</sub> в выключателях с использованием молекулярной сетки и без нее

Несмотря на то, что вдыхаемый воздух может содержать высокую концентрацию SF<sub>6</sub>, на здоровье какие-либо вредные эффекты не влияют. Максимальная концентрация газа в производственных помещениях, где рабочие находятся до восьми часов в день пять раз в неделю, не должна превышать 1000 ppmv (6000 мг/м<sup>3</sup>). Данное предельное пороговое значение (TLV) обычно используется для безопасных газов, обычно не присутствующих в атмосфере.

Чистый SF<sub>6</sub> не оказывает какого-либо вредного воздействия на окружающую среду, мутагенного или канцерогенного влияния на здоровье (ни на ДНК, ни на эпигенез).

Поэтому при работе с новым SF<sub>6</sub> достаточно принять процедуры, гарантирующие, что указанная максимальная концентрация не превышена.

Вследствие производственного процесса, серийно выпускаемый SF<sub>6</sub> не совершенно чист. Разрешенные уровни примесей установлены в стандарте Международной электротехнической комиссии МЭК 376. Они показаны на **рис. 10**.

Примесь	Макс. допустимое кол-во
CF <sub>4</sub>	500 ppm (вес.)
O <sub>2</sub> , N <sub>2</sub>	500 ppm (вес.)
Вода	15 ppm (вес.)
HF	0,3 ppm (вес.)
Гидролизный фторид	1,0 ppm (вес.), выражено в HF

**Рис. 10** : Максимальный допустимый уровень примесей в новом SF<sub>6</sub>

### Оценка риска здоровью, оказываемого SF<sub>6</sub> при горении дуги

Уровень риска здоровью, оказываемого используемым SF<sub>6</sub>, зависит от ряда факторов:

- степени распада SF<sub>6</sub> и типов присутствующих продуктов распада;
- растворения используемого SF<sub>6</sub> в окружающей среде;
- времени, в течение которого человек находится в среде, содержащей использованный SF<sub>6</sub>.

### Определение TLV – предельного порогового значения

Потенциально токсичным газам присваивается величина, известная как TLV, которая выражает их концентрацию в воздухе, обычно в частях на миллион по объему (ppmv). TLV - средневзвешенная по времени концентрация, безвредная для здоровья при нахождении в ней в течение 8 часов в день и 40 часов в неделю.

### Оценка токсичности с использованием концентрации SOF<sub>2</sub>

Несмотря на то, что используемый SF<sub>6</sub> содержит многокомпонентную смесь химических веществ, как было показано, один конкретный элемент доминирует при определении токсичности. Это газообразный продукт распада фторид тионила SOF<sub>2</sub>. Доминирование этого компонента следует из его высокой нормы выработки (образованный объем в л на энергию дуги в кДж) по сравнению с нормами выработки других продуктов распада в сочетании с его уровнем токсичности. TLV для SOF<sub>2</sub> составляет 1,6 ppmv. SOF<sub>2</sub> может далее реагировать с водой, приводя к образованию диоксида серы SO<sub>2</sub> и фтористоводородной

кислоты HF. Однако, вследствие схожей концентрации и значений TLV полное оказываемое токсичное воздействие подобно воздействию SOF<sub>2</sub> или продуктов его гидролиза.

В таблице на **рис. 11** сравниваются три продукта распада:

- фторид тионила SOF<sub>2</sub>;
- серный фторид SO<sub>2</sub>F<sub>2</sub>;
- дисерный декафторид S<sub>2</sub>F<sub>10</sub>.

Первые два продукта являются самыми широко распространёнными продуктами распада в результате дуги в SF<sub>6</sub>, тогда как последний продукт считается наиболее ядовитым.

Чтобы оказывать токсичное воздействие, химический реагент должен присутствовать в достаточном количестве относительно его TLV. «Индекс риска» в таблице указывает относительные вклады трех продуктов распада в полную токсичность газа. В типичном образце дугового SF<sub>6</sub> вклад продукта SOF<sub>2</sub> в токсичность превышает вклад продукта SO<sub>2</sub>F<sub>2</sub> примерно в 200 раз, а вклад продукта S<sub>2</sub>F<sub>10</sub> - примерно в 10000 раз. Вкладом в токсичность продукта S<sub>2</sub>F<sub>10</sub> можно явно пренебречь, то же относится и к SO<sub>2</sub>F<sub>2</sub>.

В главе 4 количество SOF<sub>2</sub>, произведенного при различных условиях, будет рассчитано и использовано для оценки уровней риска для рабочих, принимая во внимание степень растворения используемого SF<sub>6</sub> в окружающей среде и вероятное время нахождения в ней.

	Фторид тионила SOF <sub>2</sub>	Серный фторид SO <sub>2</sub> F <sub>2</sub>	Дисерный декафторид S <sub>2</sub> F <sub>10</sub>
Норма выработки (л/кДж)	3,7 x 10 <sup>-3</sup>	0,06 x 10 <sup>-3</sup>	2,4 x 10 <sup>-9</sup>
TLV (ppmv)	1,6	5	0,01
Норма выработки относительно SOF <sub>2</sub> : Pr	1	0,016	0,65 x 10 <sup>-6</sup>
Токсичность относительно SOF <sub>2</sub> : Tr	1	0,32	160
Индекс риска: Pr x Tr	1	5,12 x 10 <sup>-3</sup>	0,104 x 10 <sup>-3</sup>

**Рис. 11** : Сравнение трех продуктов распада SF<sub>6</sub>, возникающих при горении дуги

## 3. Обзор элегазового коммутационного оборудования

### 3.1. Коммутационное оборудование среднего напряжения (СН) и высокого напряжения (ВН)

Как было отмечено ранее, производители коммутационного оборудования используют уникальные диэлектрические и изоляционные свойства элегаза при проектировании оборудования. Главное назначение SF<sub>6</sub> – применение в коммутационном оборудовании среднего и высокого напряжения (см. [рис. 12](#)).

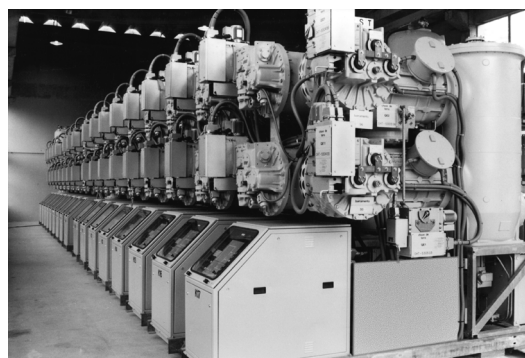
Назначение	Коммутационное оборудование	СН (- 52 кВ)	ВН (> 52 кВ)
Изоляция	КРУЭ	+++	+++
	RM6	+++	NA
Разрыв цепи	Выключатели	++	+++
	Разъединители	++	+++

#### Доля на мировом рынке:

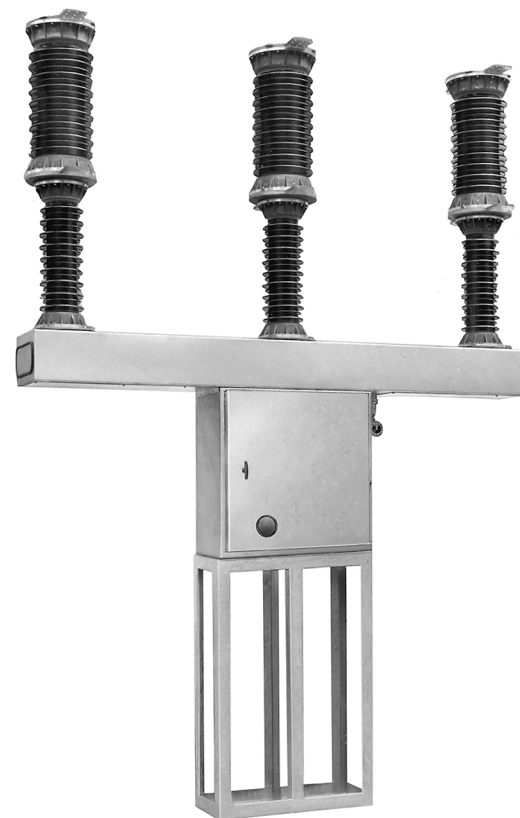
Низкая	+	КРУЭ (элегазовое изоляционное коммутационное оборудование)
Средняя	++	RM6
Высокая	+++	СВ (автоматический выключатель) LBS (разъединитель)

**Рис. 12:** Место SF<sub>6</sub> в коммутационном оборудовании

В области высокого напряжения SF<sub>6</sub> скоро станет во всем мире единственной технологией, используемой для КРУЭ (см. [рис. 13](#)) и СВ (см. [рис. 14](#)). Старые технологии с применением масла или сжатого воздуха исчезают вследствие многочисленных преимуществ SF<sub>6</sub>.

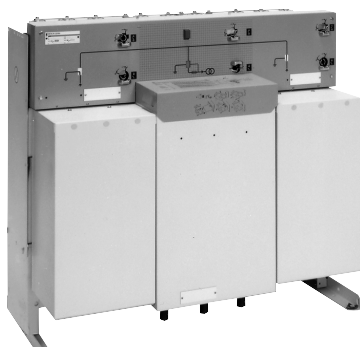


**Рис. 13:** Элегазовое изоляционное коммутационное оборудование КРУЭ (Merlin Gerin)



**Рис. 14:** Выключатель для подстанции высокого напряжения (элегазовый выключатель компании Merlin Gerin)

В области среднего напряжения, где необходимо компактное коммутационное оборудование, SF<sub>6</sub> является единственным решением (КРУЭ, RM6) (см. [рис. 15](#) и [16](#)). Однако, для отдельных компонентов технология SF<sub>6</sub> делит рынок с воздушными выключателями нагрузки-разъединителями, но доля рынка технологий с использованием воздуха быстро уменьшается в пользу SF<sub>6</sub> и вакуумных выключателей. Вакуумные и элегазовые выключатели являются современными решениями, и будут продолжать развиваться вследствие снижающегося влияния технологии с применением масла.



**Рис. 15:** Компактное распределительное устройство для сетей среднего напряжения: ячейка отходящей линии с автоматическим выключателем находится в центре (RM6 Merlin Gerin)

Чтобы полностью охватить возможные применения, мы должны упомянуть трансформаторы с элегазовой изоляцией, главным образом популярные в Японии, и газовые изолированные кабели высокого напряжения, для которых используется технология, очень похожая на технологию для КРУЭ высокого напряжения.



**Рис. 16:** Ячейка с выключателем среднего напряжения (SM6 Merlin Gerin)

### 3.2. Потребление SF<sub>6</sub> и количество коммутационной аппаратуры

Во всем мире потребление SF<sub>6</sub> разделено между коммутационным оборудованием и неэлектрическими приборами: МЭК оценивает полное ежегодное потребление в 5-8000 тонн, разделенных на две более или менее равные части между этими двумя применениями.

Чтобы понять относительную пропорцию SF<sub>6</sub> в области среднего и высокого напряжения, полезно оценить мировой парк установленного элегазового оборудования и количество оборудования, ежегодно вводимого в эксплуатацию (см. таблицу на рис. 17).

#### a - коммутационное оборудование СН

	SF <sub>6</sub> масса на единицу (кг)	Полное установленное количество		Ежегодный дополнительный прирост выключателей	
		Количество	Масса SF <sub>6</sub> (т)	Количество	Масса SF <sub>6</sub> (т)
RM6/выключатели нагрузки-разъед.	0,6	3000000	1850	240000 RM6 + 70000 выключателей	140 8
КРУЭ	6	50000	300	7000	42
Выключатели	0,3	500000	150	40000	17
Всего	—	—	2000 - 2500	—	200

#### b - коммутационное оборудование ВН

	SF <sub>6</sub> масса на единицу (кг)	Полное установленное количество		Ежегодный дополнительный прирост выключателей	
		Количество	Масса SF <sub>6</sub> (т)	Количество	Масса SF <sub>6</sub> (т)
КРУЭ	500	20000	10000	3000	1500
Выключатели откр. типа	50	100000	5000	8000	400
Газоизолированные кабели		30000 м	1000	3000 м	100
Всего	—	—	20000	—	2000

**Рис. 17:** Объем рынков элегазового оборудования среднего и высокого напряжения

Из таблиц хорошо видно, что применение SF<sub>6</sub> является преобладающим в оборудовании высокого напряжения: 90% от общего объема элегазового коммутационного оборудования предназначено для высокого напряжения, и только 10% - для среднего напряжения. В коммутацион-

ном оборудовании среднего напряжения потребление SF<sub>6</sub> касается главным образом РМБ/выключателей нагрузки-разъединителей и КРУЭ; часть, относящаяся к выключателям среднего напряжения, пренебрежимо мала.

### 3.3. Опыт EDF: 20 лет применения SF<sub>6</sub> в распределительных устройствах среднего напряжения

«Электриситэ де Франс» (EDF) - вероятно единственная компания, работающая с электрическими выключателями, имеющая 20-летний опыт работы с элегазовыми выключателями и выключателями нагрузки-разъединителями среднего напряжения, с парком оборудования, установленным компанией Merlin Gerin, включающем в себя более 20000 выключателей и 200000 выключателей нагрузки (модульного или компактного типа) на 1995 г. EDF недавно выполнила полную проверку части самой старой аппаратуры, с наибольшим количеством операций: испытание на короткое замыкание, диэлектрические испытания, испытания на нагрев, измерения герметичности и механической прочности, измерения контактного износа и газовый анализ были проведены, чтобы оценить вероятный оставшийся срок службы оборудования. Результаты этих испытаний были изданы МЭК в 1994 г. и представлены на конференции CIREC 1995.

Если быть более точными, измерения контактного износа показали максимальное значение, равное 25%. Газовый анализ использовался для оценки потенциальной токсичности в двух различных случаях: при обычной утечке и аварийном внезапном выбросе вследствие повреждения:

- в случае обычной утечки концентрация побочных продуктов в коммутационном оборудовании чрезвычайно низкая (примерно в 10000 раз ниже TLV);
- во втором случае, который происходит исключительно редко, концентрация побочных продуктов остается намного ниже любого опасного уровня.

**Как следствие, в реальных производственных условиях было продемонстрировано, что предполагаемый срок службы элегазового оборудования составляет не менее 30 лет.**

### 3.4. Тенденции развития

Элегазовое коммутационное оборудование полностью отвечает требованиям потребителей в плане компактности, надежности, сокращения времени обслуживания, безопасности персонала, срока службы. Снижение механической энергии (что приводит к более высокой надежности) для отключения выключателя может быть достигнуто применением новых способов гашения дуги, например, вращение и дутье дуги. Давление при заполнении будет снижаться, способствуя оптимальной безопасности персонала. Что касается обслуживания, можно предвидеть диагностические возможности, позволяющие контролировать в режиме реального времени состояние оборудования и предоставлять информацию пользователю о необходимости обслуживания.

Что касается герметичности, вероятное развитие коммутационного оборудования высокого напряжения можно ожидать при более низкой интенсивности утечки – например, от 0,1 до 0,5% в год. CIGRE WG 23.10 работает над руководством по повторному использованию SF<sub>6</sub>, включая определение чистоты SF<sub>6</sub>, используемого в силовом оборудовании. Таким образом рассматривается применение SF<sub>6</sub> в закрытом цикле, что поможет минимизировать его выброс в атмосферу.



Рис. 18 : Выключатель LF Merlin Gerin

## 4. Использование и обращение с газом SF<sub>6</sub> в коммутационном оборудовании

Данный раздел отвечает на вопросы потребителей относительно возможного воздействия газа SF<sub>6</sub> и его продуктов распада на безопасность персонала или

окружающую среду. За более подробной информацией обратитесь к техническому отчету МЭК 61634.

### 4.1. Заполнение новым газом SF<sub>6</sub>

Новый газ SF<sub>6</sub> поставляется в баллонах в жидком виде. Давление SF<sub>6</sub> составляет примерно 22 атмосфер по манометру. Новый газ SF<sub>6</sub> должен соответствовать стандарту Международной электротехнической комиссии МЭК 376, который определяет пределы концентраций примесей.

С новым газом SF<sub>6</sub> можно обращаться на открытом воздухе без каких-либо специальных условий. При работе в закрытом помещении с новым газом SF<sub>6</sub> необходимо учитывать следующее:

- Предельное пороговое значение TLV для нового газа SF<sub>6</sub> равняется 1000 рртv, что означает, что рабочие могут находиться в среде с концентрацией газа до этого уровня в течение восьми часов в день, пять раз в неделю. TLV не является показателем потенциальной токсичности, скорее это значение, присваиваемое газам, которых нет в атмосфере при нормальных условиях.

- Температура выше 500°C или наличие некоторых металлов при температуре выше 200°C вызывают распад SF<sub>6</sub>. При пороговых температурах этот распад может идти очень медленно. Поэтому не рекомендуется

курить, использовать открытый огонь, электросварку (кроме как в нейтральной атмосфере) или другие источники тепла, которые могут вызывать такие значения температуры в местах, где в атмосфере может присутствовать газ SF<sub>6</sub>.

- Необходимо соблюдать обычные меры предосторожности при работе с баллонами со сжатым газом. Например, внезапный выпуск сжатого газа создаст низкие температуры, которые могут вызвать быстрое замораживание. Обслуживающий персонал, работающий с таким оборудованием, должен использовать теплоизолирующие перчатки.

- Если оборудование необходимо заполнить новым газом SF<sub>6</sub>, необходимо следовать инструкциям изготовителя в следующем порядке:

- убедиться в надлежащем качестве газа SF<sub>6</sub> в оборудовании;

- устранить любой риск создания чрезмерного давления в заполняемом корпусе.

Кроме того, необходимо избегать утечки газа SF<sub>6</sub> в атмосферу во время заполнения оборудования.

#### Практический пример, условия и расчеты для оборудования высокого напряжения

A	Объем помещения (м <sup>3</sup> )		700
B	Объем корпуса выключателя (м <sup>3</sup> )		0,5
C	Давление заполнения (МПа)		0,5
D	Объем SF <sub>6</sub> /выключателя (м <sup>3</sup> )	B x C	0,25
E	Количество выключателей		7
F	Ток короткого замыкания выключателя (кА)		31,5
G	Напряжение дуги (В)		500
H	Длительность дуги (с)		0,015
I	Энергия дуги (1 разрыв/1 контакт) (кДж)	F x G x H	236,25
J	Энергия дуги (3 разрыва/3 контакта) (кДж)	9 x I	2126
K	Норма выработки SOF <sub>2</sub> (л/кДж)		3,7 x 10 <sup>-3</sup>
L	Количество вырабатываемого SOF <sub>2</sub> в выключателе (л)	K x J	7,87
M	Общее количество SOF <sub>2</sub> (л)	E x L	55,07
N	Обычный объем утечек (% в год)		1
P	Объем утечки SOF <sub>2</sub> в год (л)	M x N/100	0,55
Q	Концентрация через 1 год (ppmv)	P/A x 10 <sup>3</sup>	0,79

**Рис. 19** : Утечка SF<sub>6</sub> в помещении подстанции высокого напряжения (145 кВ)



## 4.2. Утечка газа SF<sub>6</sub> из элегазового оборудования

В данном разделе рассматриваются значение утечки газа SF<sub>6</sub> и газообразных продуктов распада в окружающую среду внутри помещения. Потенциальная токсичность атмосферы рассчитана с помощью концентрации фторида тионила SOF<sub>2</sub>.

Представлены два практических примера (один для оборудования высокого напряжения и один для оборудования среднего напряжения). В обоих примерах сделаны следующие худшие предположения:

- помещение с коммутационным оборудованием изолировано от внешней атмосферы, т.е. вентиляция в нем отсутствует;
- помещение с коммутационным оборудованием содержит соответственно 7 и 15 выключателей;
- в корпусах коммутаторов не используются адсорбенты;
- каждый из выключателей трижды отключал номинальный ток короткого замыкания;

■ норма выработки SOF<sub>2</sub> -  $3,7 \times 10^{-3}$  л/кДж энергии дуги, (наиболее часто цитируемое в научной печати значение).

В таблицах на рис. 19 и 20 приведены данные и вычисления для каждого случая. Результаты показывают, что в обоих случаях TLV для SOF<sub>2</sub> (1,6 ppmv) не превышен через 1 год утечки при максимальной скорости утечки в изолированном помещении. В действительности, при обычной вентиляции продукт SOF<sub>2</sub> разбавился бы до еще менее значительной концентрации.

**Соответственно, риск для здоровья вследствие обычной утечки используемого газа SF<sub>6</sub> из коммутационного оборудования отсутствует.**

## 4.3. Обслуживание элегазового оборудования

**Герметичное оборудование среднего напряжения не требует обслуживания частей, находящихся внутри элегазовых корпусов.**

Следовательно, они не рассматриваются в данном разделе. Для некоторых конструкций КРУЭ среднего напряжения может потребоваться обслуживание, а для большинства выключателей среднего напряжения обслуживание должно осуществляться на периодической основе. Расширение распределительного щита КРУЭ, как среднего, так и высокого напряжения может потребовать удаления SF<sub>6</sub>. Для предоставления информации по безопасным методам работы в данных условиях существует много местных строительных норм и правил, а также рекомендации производителя.

Следующие руководящие принципы являются общими для большинства из них:

- При удалении газа SF<sub>6</sub>, который может содержать продукты распада, необходимо соблюдать осторожность. Газ не следует выпускать внутри помещения. Газ необходимо собрать в резервуар для хранения. Необходимо соблюдать осторожность, чтобы не вдохнуть газ SF<sub>6</sub>, выпускаемый из оборудования. Если это невозможно, необходимо использовать респиратор. Респиратор должен быть оснащен фильтром, который удаляет газы как описано в § «Продукты распада дуги».
- Корпуса необходимо откачать, чтобы удалить как можно больше остаточного газа SF<sub>6</sub>. В некоторых случаях рекомендуется продуть корпус сухим воздухом или азотом перед его вскрытием.

### Практический пример, условия и расчеты для оборудования среднего напряжения

A	Объем помещения (м <sup>3</sup> )		120
B	Объем корпуса выключателя (м <sup>3</sup> )		$45 \times 10^{-3}$
C	Давление заполнения (МПа)		0,3
D	Объем SF <sub>6</sub> /выключателя (м <sup>3</sup> )	B x C	$13,5 \times 10^{-3}$
E	Количество выключателей		15
F	Ток короткого замыкания выключателя (кА)		31,5
G	Напряжение дуги (В)		200
H	Длительность дуги (с)		0,015
I	Энергия дуги (1 разрыв/1 контакт) (кДж)	F x G x H	94,5
J	Энергия дуги (3 разрыва/3 контакта) (кДж)	9 x I	850,5
K	Норма выработки SOF <sub>2</sub> (л/кДж)		$3,7 \times 10^{-3}$
L	Количество вырабатываемого SOF <sub>2</sub> в выключателе (л)	K x J	3,147
M	Общее количество SOF <sub>2</sub> (л)	E x L	47,2
N	Обычный объем утечек (% в год)		0,1
P	Объем утечки SOF <sub>2</sub> в год (л)	M x N/100	0,0472
Q	Концентрация через 1 год (ppmv)	P/A x 10 <sup>3</sup>	0,39

**Рис. 20** : Утечка SF<sub>6</sub> в помещении подстанции среднего напряжения (12 кВ)

- В любом случае, обслуживающий персонал должен знать о присутствии остаточного газа SF<sub>6</sub> при первом открытии корпуса и использовать респираторы. Вентиляция рабочей зоны должна быть надлежащей, чтобы быстро удалить любой газ, выпущенный из корпуса в рабочую зону.
- Металлические порошки фторида более химически активны во влажной среде, поэтому они должны быть в сухом состоянии до и во время их удаления. Мелкие

пылинки могут оставаться в воздухе в течение долгого времени, в таком случае необходимо пользоваться респираторами с субмикронными фильтрами. Особое внимание необходимо уделить защите глаз.

- Компоненты, металлические порошки фторида и адсорбенты, извлеченные из рабочего оборудования, необходимо упаковать в герметичные контейнеры для их последующей нейтрализации

#### 4.4. Окончание срока службы элегазового оборудования

Для элегазового оборудования, снятого с эксплуатации, может потребоваться нейтрализация продуктов распада, оставшихся после удаления газа SF<sub>6</sub>. Для защиты окружающей среды SF<sub>6</sub> необходимо удалить и не выпускать в атмосферу (см. § «SF<sub>6</sub> и мировая окружающая среда»). Необходимость нейтрализации зависит от уровня распада; ожидаемые уровни распада приведены в таблице на **рис. 21**.

##### Общее описание процедуры

Перед утилизацией оборудования SF<sub>6</sub> необходимо извлечь для повторного использования. Оборудование затем необходимо обработать в соответствии с нормами с ожидаемым уровнем распада. После обработки оборудование можно утилизировать как обычные отходы (с соблюдением инструкций), либо подвергнуть восстановлению, чтобы извлечь металлы. Растворы, используемые в процессе нейтрализации, можно утилизировать как обычные отходы.

##### Малый распад

Специальные действия не требуются.

##### Средний и высокий распад

Внутренние поверхности газовых корпусов необходимо нейтрализовать с помощью раствора гашеной извести (гидроксид кальция) - 1 кг извести на 100 литров воды. Обрабатываемый корпус необходимо, по возможности, заполнить раствором извести на 8 часов, а затем опорожнить корпус. Если корпус впоследствии необходимо снова использовать, его следует сначала промыть чистой водой.

Большие корпуса, которые сложно заполнить, можно очистить с помощью пылесоса, оборудованного фильтрами для нейтрализации различных веществ в отдельности. Внутренние поверхности необходимо затем промыть раствором извести, который следует оставить на месте в течение по крайней мере одного часа, а затем промыть чистой водой.

Применение	Ожидаемая степень распада SF <sub>6</sub>
Выключатель нагрузки-разъединитель среднего напряжения (КРУЭ и РМБ)	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ от 0 до нескольких десятых процента</li> <li>■ видимые отложения пыли отсутствуют</li> </ul>
Выключатели среднего и высокого напряжения	<p>среднее:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>■ до нескольких процентов</li> <li>■ небольшие порошковые отложения</li> </ul>
Любой корпус, в котором произошло аномальное образование дуги	<p>высокое:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>■ может превысить 10%</li> <li>■ порошковые отложения, от средних до значительных</li> </ul>

**Рис. 21** : Ожидаемые уровни распада SF<sub>6</sub> для различных типов оборудования

#### 4.5. Нештатные ситуации

Данный раздел посвящен оценке риска для обслуживающего персонала в случае нештатной ситуации, ведущей к неконтролируемому выпуску газа SF<sub>6</sub> в атмосферу. Такие ситуации, которые возникают очень редко, следующие:

- нештатная утечка газа вследствие разгерметизации корпуса, в котором содержится газ SF<sub>6</sub>;

- внутреннее короткое замыкание вследствие неконтролируемого образования дуги в корпусе, в котором содержится газ SF<sub>6</sub>;
- внешнее возгорание, приводящее к нештатной утечке.



### Нештатная утечка

Метод оценки риска схож с методом, используемым в разделе «утечка из элегазового оборудования», который относится к обычной утечке. Тот же пример будет использован для оборудования высокого и среднего напряжения. В следующих расчетах предполагается, что утечка всего газа SF<sub>6</sub> в одном из выключателей происходит внезапно, помещение подстанции герметичное, а вентиляция не работает (см. рис. 22). Таким образом, если бы полная утечка газа SF<sub>6</sub> произошла на подстанции, концентрация SOF<sub>2</sub> достигла бы 9,0 ppmv, т.е. приблизительно в 6 раз больше предельного порогового значения TLV.

На практике внимание было бы привлечено к нештатной утечке датчиками снижения давления, установленными на выключателях. Они обычно срабатывают при падении давления до ~80% от величины нормального давления заполнения, и в этот момент только 20% имеющегося газа SF<sub>6</sub> находится в атмосфере, вследствие чего концентрация SOF<sub>2</sub> становится равной 1,8 ppmv. В случае нештатной утечки SF<sub>6</sub> в помещении, где находится подстанция среднего напряжения (см. рис. 23), концентрация SOF<sub>2</sub>, связанная с полной утечкой SF<sub>6</sub> из одного выключателя, достигла бы 17,5 ppmv. Концентрация SOF<sub>2</sub> в помещении подстанции при 20%-ом относительном снижении давления (обычно это является сигнальным уровнем) составила бы 3,5 ppmv.

#### Практический пример, условия и расчеты для оборудования высокого напряжения

A	Объем помещения (м <sup>3</sup> )		700
B	Объем корпуса выключателя (м <sup>3</sup> )		0,5
C	Давление заполнения (МПа)		0,5
D	Объем SF <sub>6</sub> /выключателя (м <sup>3</sup> )	B x C	0,25
E	Количество выключателей		7
F	Ток короткого замыкания выключателя (кА)		31,5
G	Напряжение дуги (В)		500
H	Длительность дуги (с)		0,015
I	Энергия дуги (1 разрыв/1 контакт) (кДж)	F x G x H	236,2
J	Энергия дуги (3 разрыва/3 контакта) (кДж)	9 x I	2,126
K	Норма выработки SOF <sub>2</sub> (л/кДж)		3,7 x 10 <sup>-3</sup>
L	Количество вырабатываемого SOF <sub>2</sub> в выключателе (л)	K x J	7,87
M	Давление заполнения относительно атмосферного (МПа)	C - 0,1	0,4
N	Количество SOF <sub>2</sub> , утечка которого возможна (л)	L x M/C	6,3
P	Концентрация SOF <sub>2</sub> в коммутационном зале (ppmv)	N / A	9,0

Рис. 22 : Нештатная утечка SF<sub>6</sub> в помещении подстанции высокого напряжения (145 кВ)

#### Практический пример, условия и расчеты для оборудования среднего напряжения

A	Объем помещения (м <sup>3</sup> )		120
B	Объем корпуса выключателя (м <sup>3</sup> )		45 x 10 <sup>-3</sup>
C	Давление заполнения (МПа)		0,3
D	Объем SF <sub>6</sub> /выключателя (м <sup>3</sup> )	B x C	13,5 x 10 <sup>-3</sup>
E	Количество выключателей		15
F	Ток короткого замыкания выключателя (кА)		31,5
G	Напряжение дуги (В)		200
H	Длительность дуги (с)		0,015
I	Энергия дуги (1 разрыв/1 контакт) (кДж)	F x G x H	94,5
J	Энергия дуги (3 разрыва/3 контакта) (кДж)	9 x I	850,5
K	Норма выработки SOF <sub>2</sub> (л/кДж)		3,7 x 10 <sup>-3</sup>
L	Количество вырабатываемого SOF <sub>2</sub> в выключателе (л)	K x J	3,147
M	Давление заполнения относительно атмосферного (МПа)	C - 0,1	0,2
N	Количество SOF <sub>2</sub> , утечка которого возможна (л)	L x M/C	2,098
P	Концентрация SOF <sub>2</sub> в коммутационном зале (ppmv)	N / A	17,5

Рис. 23 : Нештатная утечка SF<sub>6</sub> в помещении подстанции среднего напряжения (12 кВ)

В обоих описанных выше случаях TLV для SF<sub>2</sub> (1.6 ppmv) может быть превышено, но незначительно. При этих обстоятельствах воздействие в течение короткого периода представляет незначительный риск. Острый, неприятный запах SF<sub>2</sub> можно почувствовать при концентрации приблизительно 1 ppmv, и это означает, что большинство людей немедленно почувствуют присутствие газа при концентрациях, приближающихся к TLV. Однако для того, чтобы определить наличие газа, воздух вдыхать не рекомендуется.

### Внутреннее короткое замыкание

Внутреннее короткое замыкание может произойти, если дуга неправильно образовалась между главными контактами коммутационного устройства или между главным контактом и заземлением. Такие замыкания происходят очень редко. Неправильное образование дуги приводит к быстрому увеличению давления, что может привести к выбросу горячих газов и других продуктов. Хотя внутреннее короткое замыкание может произойти в любом корпусе высокого напряжения, данный раздел посвящен внутренним коротким замыканиям в корпусах, заполненных газом SF<sub>6</sub>. Существуют три возможные причины возникновения таких замыканий:

- 1 - Внутреннее короткое замыкание, которое не приводит к нештатному выбросу газа SF<sub>6</sub>. Это может произойти, если энергия, поданная коротким замыканием, недостаточна для того, чтобы вызвать возгорание или срабатывание предохранительного клапана (устройства разгрузки давления).
- 2 - Внутреннее короткое замыкание, при котором энергия дуги приводит к расплавлению стенки (обычно металлической, образующей один электрод дуги) или ее испарению, в результате чего в ней образуется отверстие. Этот тип замыкания относится главным образом к КРУЭ высокого напряжения.
- 3 - Внутреннее короткое замыкание, при котором повышение давления в корпусе достаточно для срабатывания устройств разгрузки давления. Этот процесс управляется перепускным клапаном или происходит разрушение специально ослабленной области корпуса, что приводит к направленному выбросу горячего газа.

Рассмотрим риск для обслуживающего персонала при замыканиях типа 2 и 3. Риск, связанный с использова-

нием SF<sub>6</sub> оцениваются на основании количества выпускаемого в атмосферу газа SF<sub>2</sub>. Потенциально вредное воздействие других ядовитых паров, не связанных с использованием SF<sub>6</sub>, также рассматривается. Будет отмечено, что эти другие побочные продукты, которые также присутствуют при внутреннем коротком замыкании в оборудовании любого типа, могут нести основной вклад в токсичность атмосферы.

Делаются следующие предположения:

- Для оборудования среднего напряжения, содержащего небольшой объем SF<sub>6</sub>, предполагается, что большая часть газа выпускается из корпуса за 50 мс. Данное предположение основано на измерениях давления, сделанных во время испытаний на внутреннее короткое замыкание.

Количество образованного SF<sub>2</sub> рассчитывается, используя период производства, равный 50 мс.

- Для оборудования высокого напряжения будет использоваться период производства SF<sub>2</sub>, равный 100 мс, поскольку длительность короткого замыкания в системах высокого напряжения обычно ограничивается приблизительно 100 мс.

- Предполагается, что помещение подстанции изолировано от внешней окружающей среды.

- Воздействие адсорбентов, вероятно, будет незначительным в пределах интересующего периода времени.

- Весь SF<sub>2</sub>, произведенный при коротком замыкании, выпускается в помещение (см. рис. 24 и 25).

Результаты показывают, что в пределах помещения могут быть образованы существенные концентрации SF<sub>2</sub>. Подробные токсикологические данные для SF<sub>2</sub>, к сожалению, недоступны, но известно, что большие млекопитающие (кролики) могут выдержать воздействие в течение одного часа при концентрациях до 500 ppmv (см. раздел 4.2.2. стандарт МЭК 1634 -1995).

Другие потенциально ядовитые вещества образуются при внутреннем коротком замыкании, включая пары металлов и пластмассы. Эти неизбежные продукты, которые не связаны с использованием SF<sub>6</sub>, могут доминировать, если рассматривать полную токсичность атмосферы. Это относится к любому типу коммутационного оборудования, элегазового или нет (см. раздел С 4.7.2. и С 4.7.3 стандарт МЭК 1634-1995).

### Практический пример, условия и расчеты для оборудования высокого напряжения

A	Объем помещения (м <sup>3</sup> )		700
B	Объем корпуса выключателя (м <sup>3</sup> )		31,5
C	Напряжение дуги (В)		1,000
D	Длительность дуги (с)		0,1
E	Энергия дуги (2 дуги, фаза-фаза) (кДж)	B x C x D	6,300
F	Норма выработки SF <sub>2</sub> (Al электроды) (л/кДж)		10 x 10 <sup>-3</sup>
G	Количество SF <sub>2</sub> , образованного в выключателе (л)	E x F	94,5
H	Концентрация SF <sub>2</sub> в коммутационном зале (ppmv)	G/A	135

Рис. 24 : Внутреннее короткое замыкание внутри помещения подстанции с КРУЭ высокого напряжения (145 кВ)

Например, при коротком замыкании ошиновки испаряется только 10 граммов меди в атмосферу используемого в примере помещения, концентрация (пренебрегая эффектами окисления) будет равна (масса меди/объем помещения) 83 мг/м<sup>3</sup>. TLV для пара меди составляет 0,2 мг/м<sup>3</sup>. Это означает, что концентрация паров меди могла достигнуть значения, в 400 раз превышающего пороговое значение TLV. Аналогично, полное испарение только 32 граммов поливинилхлорида (эквивалент изоляции 1,2 м стандартного провода сечением 1 мм<sup>2</sup>) может привести к концентрации винилхлорида в атмосфере, превышающей TLV в 100 раз (2,6 мг/м<sup>3</sup>).

**Таким образом, можно сделать вывод, что при любом внутреннем коротком замыкании коррозионные и/или токсичные пары образуются вне зависимости от того, присутствует газ SF<sub>6</sub>, или нет. В случаях, когда эти пары попадают в атмосферу помещения подстанции, продукты, не связанные с газом SF<sub>6</sub> будут наверняка иметь доминирующий вклад в общую токсичность. Это дополнительно говорит в пользу того, что использование газа SF<sub>6</sub> в коммутационном оборудовании не приводит к существенному увеличению риска, связанного с образованием внутреннего короткого замыкания.**

### Внешнее возгорание

Возгорания на открытом воздухе редко создают проблемы вследствие относительного отсутствия огнеопасного материала рядом с коммутационным оборудованием. Для оборудования внутри помещения, особенно для подстанций среднего напряжения, существует большой риск возгорания рядом с коммутационным оборудованием. Исследования показали, что температура возгорания редко превышает 800°C, а температура рядом с корпусами элегазового оборудования, защищенного металлической наружной обшивкой, наверняка будет намного ниже этого значения. Очень маловероятно, чтобы выброс SF<sub>6</sub> был вызван возгоранием. Если же это все же произошло, средние температуры, вероятно, будут слишком низкими (поскольку SF<sub>6</sub> будет быстро рассеян посредством конвекции в области с меньшими температурами), чтобы привести к существенному распаду, для которого требуется температура не менее 500°C. SF<sub>6</sub> не воспламеняется и будет гасить возгорание.

Рабочие, участвующие в борьбе с пожаром, должны использовать соответствующее снаряжение для защиты от паров горячей пластмассы.

### Практический пример, условия и расчеты для оборудования среднего напряжения

A	Объем помещения (м <sup>3</sup> )		120
B	Объем корпуса выключателя (м <sup>3</sup> )		31,5
C	Напряжение дуги (В)		1,000
D	Длительность дуги (с)		0,5
E	Энергия дуги (2 дуги, фаза-фаза) (кДж)	B x C x D	1,575
F	Норма выработки SOF <sub>2</sub> (Cu электроды) (л/кДж)		3,7 x 10 <sup>-3</sup>
G	Количество SOF <sub>2</sub> , образованного в выключателе (л)	E x F	5,83
H	Концентрация SOF <sub>2</sub> в коммутационном зале (ppmv)	G/A	48,6

**Рис. 25** : Внутреннее короткое замыкание в помещении подстанции среднего напряжения (12 кВ)

## 4.6. SF<sub>6</sub> и окружающая среда

Вещества, загрязняющие атмосферу, образующиеся в результате деятельности человека, делятся на две категории в соответствии с воздействием, оказываемым ими:

- истощение стратосферного озона (дыры в озоновом слое);
- глобальное потепление (парниковый эффект).

SF<sub>6</sub> не значительно влияет на истощение стратосферного озона, поскольку не содержит хлор, являющийся главным реагентом в катализе озона, ни на парниковый эффект, поскольку количества, присутствующие в атмосфере, являются очень небольшими (см. приложение D к МЭК 1634 (1995) и Electran<sup>®</sup>164 (2), 1996).

### Политика Schneider Electric в области охраны окружающей среды

Осознавая необходимость бережного отношения к окружающей среде, компания Schneider Electric определила правила, касающиеся выпускаемых ею изделий и систем, обеспечивающих безопасность использования электроэнергии. Действия по защите и охране окружающей среды предпринимаются не только в группе, но и вне ее, предоставляя соответствующую информацию клиентам, поставщикам и партнерам.

Что касается обращения с SF<sub>6</sub>, то для этого были разработаны специальные инструкции и правила, как для внутреннего использования, так и для потребителей.

■ Внутренние процедуры определяют качество SF<sub>6</sub>, необходимое для того, чтобы гарантировать функционирование коммутационного оборудования, как для дизэлектрических, так и для коммутационных применений.

Критерии в данном случае основаны на стандартах МЭК 376 по защите персонала и окружающей среды.

Соответствующие процедуры и специальное оборудование (соединение, нагнетание насосом) были выбраны для минимизации выбросов SF<sub>6</sub> на каждой стадии (производство, установка и ввод в эксплуатацию, обслуживание, конец срока службы).

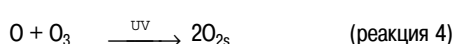
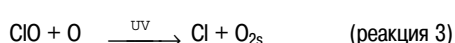
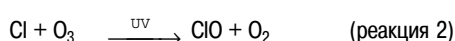
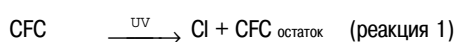
■ Пользователю (клиенту) предоставляется соответствующая информация для других случаев (обычная эксплуатация, обслуживание и др.), указанная в инструкции, прилагаемой к каждому изделию. Однако, для целей безопасности персонала и окружающей среды ремонт (особенно капитальный) выполняется компанией Schneider Electric или при ее наблюдении в специальных сервисных центрах. В этих процедурах описаны действия по обработке газа. Газ, который не соответствует указанным значениям, можно специально обработать на месте с помощью надлежащего газового оборудования. Обработку газа после дугового распада также может выполнить компания Schneider Electric по разработанной запатентованной технологии, в которой применяется раствор извести для нейтрализации. Данная процедура отвечает требованиям клиентов, например при утилизации оборудования в конце срока его службы. Это обслуживание проводится сервисной службой.

Существующие процедуры применяются:

- на наших установках (заполнение, повторное использование);
- в течение обслуживания (промывание, повторное наполнение);
- для утилизации в конце срока службы.

### Истощение озонового слоя

Международное сообщество осознает риски, связанные с разрушением озонового слоя, которые могут нанести вред здоровью и окружающей среде. Механизм разрушения озона (O<sub>3</sub>) в случае CFC (хлорированный фторуглерод) требует присутствия свободных атомов хлора, которые выпускаются, когда молекулы CFC попадают под воздействие ультрафиолетового излучения. Эти реакции следующие:



Молекулярные связи CFC разрушаются ультрафиолетовым излучением; при этом высвобождаются атомы хлора (реакция 1). Они реагируют с озоном, образуя ClO, который в свою очередь реагирует со свободным кислородом, высвобождая атом хлора, который может еще раз вступить в реакцию 2. Это называется каталитическим циклом. Один атом хлора может участвовать в этом цикле десять тысяч раз, прежде чем он будет нейтрализован реакцией, в которой не участвует озон. Однако, SF<sub>6</sub> не распадается от света на высоте озонового слоя (32-44 км), поэтому он выпускает лишь очень небольшое количество атомного фтора. Любой высвобожденный фтор стремится объединиться со свободным водородом, а не с озоном. Кроме того, концентрация SF<sub>6</sub> в 1000 раз меньше концентрации CFC's.

### Парниковый эффект

Температура у поверхности земли повышается в течение дня из-за солнечного излучения и падает в течение ночи, поскольку тепло уходит вследствие инфракрасного излучения. Часть инфракрасного излучения, особенно в диапазоне длины волны от 7 до 13 мкм отражается назад к поверхности земли. Отражательная способность атмосферы при такой длине волны увеличивается за счет присутствия «парниковых» газов – например, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O и O<sub>3</sub>, и особенно за счет газов, вырабатываемых вследствие деятельности человека и машин: CO<sub>2</sub> при сжигании ископаемого топлива, N<sub>2</sub>O от интенсивного сельского хозяйства, CFC от аэрозолей и рефрижераторов и CH<sub>4</sub> от интенсивного животноводства. SF<sub>6</sub> обладает свойством поглощения инфракрасного излучения и считается низшим парниковым газом с очень большим сроком жизни в атмосфере. Однако, его вклад в глобальное потепление является очень небольшим вследствие чрезвычайно низкой концентрации SF<sub>6</sub> в атмосфере (см. рис. 26). Вклад SF<sub>6</sub> меньше 1/10000 части полного вклада других реагентов и поэтому крайне незначителен. Однако, соображения касательно защиты окружающей среды во многие годы вперед рекомендуют регенерировать SF<sub>6</sub> в течение обслуживания или в конце срока эксплуатации, чтобы минимизировать накопление этого газа в атмосфере.

Газ	Концентрация (ppbv)	Вклад
CO <sub>2</sub>	353 x 10 <sup>3</sup>	60
CH <sub>4</sub>	1,7 x 10 <sup>3</sup>	15
N <sub>2</sub> O	310	5
O <sub>3</sub>	10-50	8
CFC-11	0,28	4
CFC-12	0,48	8
SF <sub>6</sub>	0,002	10 <sup>-2</sup>

Рис. 26 : Оценка вклада различных газов в парниковый эффект

## 5. Заключение

Применение SF<sub>6</sub> в коммутационном оборудовании для всех условий эксплуатации дало преимущества, выраженные в производительности, размере, массе, общих затратах и надежности. Стоимость покупки и эксплуатации, в которую входят затраты на обслуживание, могут быть значительно ниже затрат для коммутационного оборудования старого типа, например, для выключателей среднего напряжения компания «Электриситэ де Франс» (EDF) сократила общую кумулятивную продолжительность

технического обслуживания одного выключателя с 350 до 30 часов.

Многолетний опыт эксплуатации подтверждает предположения, сделанные в этом документе, о том, что SF<sub>6</sub> не представляет ни обслуживающему персоналу, ни окружающей среде какой-либо опасности при соблюдении элементарных правил обращения и эксплуатации элегазового оборудования.

## Приложение 1: Список литературы

### Стандарты 61634

- МЭК/TR2 1634: Коммутационное оборудование высокого напряжения - использование гексафторида серы (SF<sub>6</sub>) в коммутационном оборудовании высокого напряжения. Издание первое.
- МЭК 60376: Технические характеристики и заполнение новым газом гексафторида серы. Издание первое (Приложение А-1973), (Приложение В-1974).

### Технические тетради Schneider Electric

- «Исследование температурных особенностей электрических распределительных щитов низкого напряжения». Техническая тетрадь № 145, январь 1990 г. Автор: К. Килиниджан.
- «Отключение посредством автоматического расширения». Техническая тетрадь № 171, декабрь 1993 г. Автор: Ж. Бернар

### Другие публикации

- CIGRE WG 23-01: «Руководство по переработке SF<sub>6</sub> для повторного использования». Рабочая группа целевого назначения 01, август 1996 г.
- CIREД: «Последовательное развитие технических объектов компании «Электриситэ де Франс» с использованием элегазовых аппаратов среднего напряжения». 1995 г. Авторы: Б. Жуайе, Ж. Перриссен, М. Ребуль.
- ELECTРАН® 164: «SF<sub>6</sub> и мировая атмосфера». Рабочая группа целевого назначения 01, февраль 1996 г.
- МЭК: «Элегазовое коммутационное оборудование среднего напряжения: ситуация через 20 лет службы». 1994 г.

**Для заметок**

---

**Для заметок**

---