УДК 621.3.048.1
DOI: 10.53015/18159958_2025_21_3_19

ПОПАДАНИЕ ВОДЯНОГО ПАРА ДИФФУЗИОННЫМ ПУТЕМ В ГАЗОИЗОЛЯЦИЮ ЭЛЕГАЗОВОГО ТОКОПРОВОДА

INGRESS OF WATER VAPOR BY DIFFUSION INTO THE SF_6 GAS INSULATION OF CONDUCTOR

©2025

Зацепина Виолетта Иосифовна[1], доктор технических наук, профессор кафедры электрооборудования
Лавров Андрей Александрович[2], аспирант, преподаватель кафедры электрооборудования
Zatsepina Violetta Iosifovna[1], Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Electrical Equipment
Lavrov Andrey Aleksandrovich[2], Graduate Student, Lecturer of the Department of Electrical Equipment

Липецкий государственный технический университет, Липецк (Россия)
Lipetsk State Technical University, Lipetsk (Russia)

E-mail: vizatsepina@yandex.ru [1]ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8347-4479
E-mail: alavrov1404@gmail.com [2]ORCID: https://orcid.org/0009-0004-7224-0190

Аннотация: В данной статье рассмотрены основные преимущества и недостатки элегаза как диэлектрика. Особое внимание уделено попаданию влаги диффузионным путем в герметичный сосуд, наполненный элегазом, как одной из малоизученных причин ослабления его диэлектрических свойств. Результатом исследования стал вывод формул абсолютной влажности SF_6 для коаксиального участка элегазового токопровода КРУЭ, которая позволит определить фактический объем воды в герметичном элегазовом оборудовании КРУЭ.

Ключевые слова: элегаз, SF_6, влажность элегаза, диэлектрические характеристики, элегазовый токопровод, комплектные распределительные устройства элегазовые, газоизоляция распределительных устройств.

Для цитирования: Зацепина В.И. Попадание водяного пара диффузионным путем в газоизоляцию элегазового токопровода / В.И. Зацепина, А.А Лавров // Вести высших учебных заведений Черноземья. – 2025. – Т. 21, № 3 (79). – С. 19–27. – DOI 10.53015/18159958_2025_21_3_19.

Abstract: This article examines the main advantages and disadvantages of SF_6 as a dielectric. Particular attention is paid to moisture penetration by diffusion into a sealed vessel filled with SF_6, as one of the little-studied causes of the weakening of its dielectric properties. The study resulted in the development of formulas for the absolute humidity of SF_6 for the gas-insulated busbar section of complete switchgear units containing SF_6, which will allow one to determine the actual volume of water in sealed equipment of complete switchgear units containing SF_6.

Keywords: electrical gas, SF_6, SF_6 gas humidity, dielectric characteristics, SF_6 conductors, SF_6 switchgear, gas-insulated switchgear.

For citation: Zatsepina V.I. Ingress of water vapor by diffusion into the SF_6 gas insulation of conductor / V.I. Zatsepina, A.A. Lavrov // Vesti of Higher Educational Institutions of the Chernozem region. – 2025. – Vol. 21, № 3 (79). – P. 19–27. – DOI 10.53015/18159958_2025_21_3_19.

ВВЕДЕНИЕ

Электрический газ SF_6 (гексафторид серы, шестифтористая сера, элегаз), впервые синтезированный французским химиком Анри Муассаном в 1890-м году и предложенный в качестве электрической газовой изоляции электрического оборудования благодаря исследованиям советского ученого Б.М. Гохберга [11] (1947 год), получил распространение за рубежом в середине 60-х годов прошлого века. Серийное производство комплектных распределительных устройств с SF_6 в качестве изоляционной среды в СССР началось в середине 1970-х годов. В результате многочисленных исследований и опытов было выявлено, что элегаз как газоизолирующая среда, находящаяся между токопроводящей жилой и оболочкой, имеет ряд преимуществ по сравнению с другим газом, применяемым в качестве изолятора в электрооборудовании, — атмосферным воздухом.

В элегазонаполненном газоизолированном оборудовании КРУЭ-35 кВ и выше в качестве диэлектрической среды используется SF_6 под избыточным давлением, являющийся инертным газом, не вступающим в реакцию с материалами токоведущих жил и герметичной оболочки газоизолированного объема. Однако, при возникновении явления электрической дуги, а также при наличии паров воды в газоизоляторе, которые проникают в герметичный объем диффузионным путем, SF_6 разлагается на низшие фториды, которые вступают в агрессивную реакцию с материалами токоведущих жил и оболочки. Таким образом, изоляционные свойства элегаза ухудшаются и становится возможен пробой.

Цель работы — вывести формулу, определяющую величину абсолютной влажности элегаза, попадающей в газоизолированный участок коаксиального токопровода в том числе диффузионным путем из атмосферного воздуха.

Задачи: рассмотрение характеристик элегаза при его использовании в качестве изолирующей среды; сравнение элегаза с другими диэлектриками; анализ процесса увлажнения герметичного объема с SF_6 диффузионным путем.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектом исследования является элегазонаполненное герметичное оборудование.

Предметом исследования выступает попадание атмосферной влаги в газоизолированный участок коаксиального элегазового токопровода КРУЭ диффузионным путем.

Материальной базой исследования главным образом послужили РД 16.066-05 «Элегазовое электротехническое оборудование. Технические требования к производству для обеспечения качества элегаза в оборудовании и меры обеспечения санитарно-гигиенической и экологической безопасности», ГОСТ Р 54426–2011 (МЭК 60480:2004) «Руководство по проверке и обработке элегаза (SF_6), взятого из электрооборудования, и технические требования к его повторному использованию», а также документы, представленные в списке литературы.

Методами исследования являются теоретический анализ и обобщение имеющихся источников, научных исследований и нормативных документов в области исследований диэлектрических характеристик SF_6, изменение его характеристик в зависимости от изменения влажности газа.

ПРИМЕНЕНИЕ SF_6 В КРУЭ

Основными положительными характеристиками SF_6 по сравнению с атмосферным воздухом являются высокое значение диэлектрической прочности (табл. 1) [15], характеризующая величину напряженности электрического поля среды, при которой происходит электрический пробой напряжения, приложенного к одному из электродов, на другой электрод, а также хорошая теплоотводность и дугогасительная способность элегаза (табл. 2) [13]. Химически чистый элегаз промышленной чистоты (табл. 3) [2, 10], применяемый в электроустановках напряжением 35–500 кВ, является инертным газом, примерно в 5 раз тяжелее воздуха, не имеет запаха и цвета, не горюч, не токсичен для эксплуатирующего персонала. Элегаз при нормальном атмосферном давлении (0,1 МПа) является газом, сжижается только при повышении давления до 1,31 МПа при t окружающей среды 0 °С [1].

SF_6 является одним из газов, которые влияют на развитие парникового эффекта планеты [1], однако современное оборудование и своевременное обслуживание элегазонаполненного оборудования гарантирует незначительное влияние на развитие парникового эффекта [4–7].

Элегаз в качестве изоляционной, теплоотводящей и дугогасящей среды получил широкое распространение в электрооборудовании КРУЭ (комплектное распределительное устройство, в котором SF_6 является диэлектрической средой между токоведущей жилой и герметичной оболочкой – корпусом оборудования), позволив уменьшить площадь территории, занимаемую электрооборудованием подстанции, из-за более высоких изоляционных характеристик SF_6 относительно оборудования открытых распределительных устройств с воздушной изоляцией (рис. 1) [14].

Таблица 1

Физические свойства SF_6 по отношению к другим газам

Table 1

Physical properties of SF_6 in relation to other gases

Газ	Молекулярный вес	Точка кипения (°C)	Диэлектрическая прочность по отношению к SF_6
CO_2 (двуокись углерода)	44	- 78,5	0,45
N_2 (азот)	14	- 196,0	0,40
Атмосферный воздух	29	- 194,0	0,50
CF_4 (тетрафторид углерода)	88	- 128,0	0,46
C_2F_6 (гексафторэтан)	138	- 78,0	0,78
C_3F_8 (октафторпропан)	188	- 37,0	0,96
SF_6 (элегаз)	146	- 63,0	1

Одним из основных преимуществ SF_6 как материала, применяемого в качестве изоляционной среды (диэлектрика), является его инертность. Это значит, что SF_6, не содержащий примесей, при нормальном атмосферном давлении 0,1 МПа и температуре до 200 °С не вступает в химические реакции с материалами электрооборудования, где он применяется [8]. Однако, при возникновении в элегазонаполненном газоизолированном оборудовании КРУЭ явления электрической дуги, температура которого достигает 15000 °К, происходит разложение SF_6 с выпадением «серого порошка»; образование продуктов разложения SF_6; низших фторидов серы (HF, $SOF_2(SF_4)$, SOF_4, SiF_4, $S_2F_{10}(SF_5)$, SO_2F_2, SO_2. Продукты разложения SF_6 являются агрессивными окислителями, которые при наличии внутри герметичной оболочки элегазонаполненного оборудования даже небольшого количества паров воды, вступают с материалами токоведущих жил, опорных изоляторов и оболочки оборудования в реакцию, что в конечном итоге ухудшает диэлектрические характеристики изоляционной среды.

К примеру, на рис. 2 представлена фотография штекерного контакта участка элегазового токопровода, переходное сопротивление которого было нарушено в связи с разрушением медных контактных пружинок, которое произошло в связи с взаимодействием низших фторидов с парами воды, проникшими в оболочку оборудования с SF_6. Таким образом, SF_6 в качестве газоизолирующей среды в электроустановках высокого напряжения имеет ряд преимуществ по сравнению с другими газами в области диэлектрических характеристик, а использование оборудования КРУЭ позволяет сократить площадь, занимаемую электроустановкой сравнительно с оборудованием открытого исполнения (с воздушной изоляцией). Однако, при попадании диффузионным путем в газоизолированное оборудование с SF_6 влаги из атмосферного воздуха, диэлектрические характеристики SF_6 ухудшаются, что может привести к пробою изоляции.

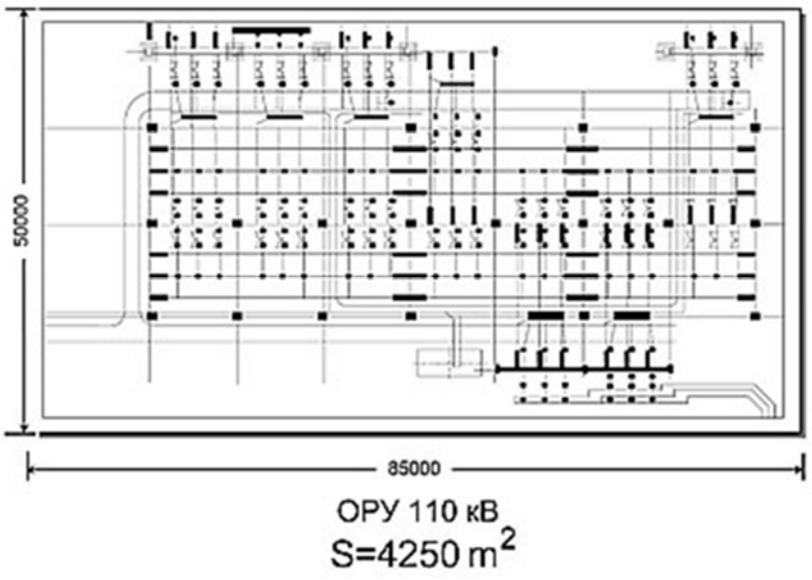
Таблица 2

Физические свойства газов, используемых в высоковольтных конструкциях

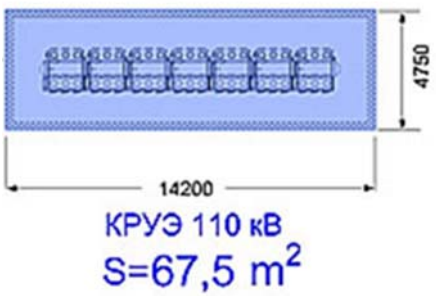
Table 2

Physical properties of gases used in high-voltage structures

Параметры	N_2	CO_2	SF_6
Молекулярная масса	28,013	44,011	146,050
Плотность газа, кг/м3, при 0 °С и давлении 0,1 МПа	1,250	1,980	6,390
Температура кипения, К, при давлении 0,1 МПа	77,4	194,7	318,7
Теплоемкость газа при давлении 0,1 МПа и 0 °С, кДж/ (кг · К)	1,060	0,820	0,625
Теплопроводность газа при давлении 0,1 МПа и 0 °С, Вт/ (м · К)	0,024	0,015	0,0127
Электрическая прочность (по отношению к воздуху)	1,0	0,9	2,6



a)



b)

Рис. 1. Сравнение площадей, занимаемых ОРУ (a) и КРУЭ (b) одного класса напряжения с одинаковым количеством присоединений

Fig. 1. Comparison of the areas occupied by an open switchgear (a) and a complete gas-insulated switchgear (b) of the same voltage class with the same number of connections

Таблица 3

Основные физические свойства SF_6 при нормальном атмосферном давлении 0,1 МПа и температуре 25 °С

Table 3

Basic physical properties of SF_6 at normal atmospheric pressure of 0.1 MPa and temperature of 25 °C

Плотность, кг/м^3	6,14
Теплопроводность, Вт/м · К	0,0136
Критическая точка: – температура, °С – плотность, кг/м^3 – давление, МПа	 45,55 730 3,78
Удельная теплоемкость, Дж/моль·К	96,6



Рис. 2. Результат взаимодействия продуктов разложения SF_6 с парами воды, воздействие которых на медные контактные пружинки в месте соединения участков токопровода привело к их разложению

Fig. 2. The result of the interaction of SF_6 decomposition products with water vapor, the effect of which on copper contact springs at the junction of sections of the conductor led to their decomposition

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЕЛИЧИНЫ ФАКТИЧЕСКОГО СОДЕРЖАНИЯ ВЛАГИ В ГАЗОИЗОЛЯИИ КРУЭ

Согласно [3], для безотказной работы элегазового оборудования требуется производить контроль влаги в газовой изоляции, которая попадает в герметичную оболочку элегазонаполненного оборудования КРУЭ внутренней установки диффузионным путем через неплотности фланцевых соединений и резиноуплотнений. Тогда формула материального баланса влаги согласно [9] будет иметь вид:

$$A \cdot V + 10\frac{A}{A_t}\sum\left(g_{ki} \cdot a_{ki}^0\right) + \\ + \frac{N}{N_н} \cdot P_{H_2O} \cdot \Delta_P \sum\left(\frac{S}{x}\right)\frac{3{,}1557 \cdot 10^7 \cdot 18}{22400}, \quad (1)$$

где A – абсолютная влажность SF_6 на момент измерений, г/м^3; V – объем исследуемого герметичного сосуда, м^3; A_t – абсолютная влажность при насыщении при температуре окружающей среды во время замера влажности, г/м^3; g_{ki} – масса изоляционного материала i, кг (SF_6, опорных изоляторов, резиноуплотнений); a^0_{ki} – влажность изоляционного материала при относительной влажности 100%, %-масс; N – срок службы оборудования, оставшийся до конца эксплуатации оборудования (к примеру, для элегазового оборудования КРУЭ типа ЯЭ-110, заявленный заводом-изготовителем «НИИВА» срок службы составляет 40 лет, т. е. $N_{ЯЭ\text{-}110} = 40 – N_{лет}$ эксплуатации с момента ввода в эксплуатацию); $N_н$ – назначенный заводом-изготовителем срок службы; P_{H2O} – коэффициент проницаемости паров воды, см^3·см/см^2·МПа·с; Δp – средний перепад парциальных давлений на уплотнении, МПа; S – площадь сечений уплотнений коаксиального (цилиндрического) участка газоизолированного токопровода на стыках фланцевых соединений токопроводов, предусматривающая изоляцию объема участков токопроводов от других газоизолированных объемов КРУЭ в виде глухого опорного изолятора, см^2; x – длина диффузионного пути влаги, перпендикулярного герметичной оболочке газоизолированного объема токопровода, см; $3{,}1557 \cdot 10^7$ – число секунд в году; 18 – масса грамм-моля воды; 22400 – объем грамм-моля газа, мл.

Согласно п. 1.1 [3], при конструировании газоизолированного электрооборудования КРУЭ внутренней установки должно выполняться требование на размеры уплотнений:

$$P_{H_2O} \cdot \sum\left(\frac{S}{x}\right) < 10^{-1}\frac{V}{N_н}. \quad (2)$$

Проанализировав соотношение (2), можно сделать вывод, что норматив содержания влаги в газоизолированном герметичном объеме SF_6 соблюдается при условии того, что величина влаги, попадающая в герметичный объем с SF_6 диффузионным путем через неплотности уплотнений и фланцевых соединений, должна быть меньше одной десятой величины объема герметичного сосуда к сроку службы оборудования, заявленного заводом изготовителем.

Для дальнейшего определения величины абсолютной влажности SF_6 допустимо следующее упрощение; для соблюдения и выполнения условия лимита на уплотнения (2) [3], допустим, что величина рассчитываемого лимита на уплотнения не должна превышать десятой части требуемого согласно (2) лимита на уплотнения [3]:

$$P_{H_2O} \cdot \sum\left(\frac{S}{x}\right) \le 10^{-1} \cdot 10^{-1}\frac{V}{N_н} \le 10^{-2}\frac{V}{N_н}. \quad (3)$$

Зная вышеперечисленные соотношения, а также что влажность A в газоизолированном объеме токопровода в конце срока службы $N_н$ составит 4,5 г/м^3 при влажности при насыщении A_t = 17,3 г/м^3 при t = 20 °C (данные из гигрометрических таблиц согласно [3]), а средний перепад парциальных давлений на уплотнении Δ_p = 0,0017 МПа, составим соотношение материального баланса влажности в герметичном объеме элегазового токопровода, где с левой стороны будут значения на момент измерения влажности, а с правой – конечные условия по влажности элегаза к концу срока службы оборудования:

$$A \cdot V + 10\frac{A}{A_t}\sum\left(g_{ki} \cdot a_{ki}^0\right) + \frac{N}{N_н} \cdot P_{H_2O} \cdot \Delta_P \sum\left(\frac{S}{x}\right) \cdot$$

$$\cdot 25358,3 \le 4,5 \cdot V + 10\frac{4,5}{17,3}\sum\left(g_{ki} \cdot a_{ki}^0\right). \quad (4)$$

Подставив значение (3) в соотношение (4) и преобразовав, получим:

$$A + \frac{10}{V}\frac{A}{A_t}\sum\left(g_{ki} \cdot a_{ki}^0\right) \le$$

$$\le 4,5 + \frac{2,6}{V}\sum\left(g_{ki} \cdot a_{ki}^0\right) - 0,431\frac{N}{N_н}. \quad (5)$$

На основании (5) и величины норматива требования на размеры уплотнений (2), выведем формулу абсолютной влажности *A* [г/м^3] для коаксиального герметичного газоизолированного участка элегазового токопровода КРУЭ внутренней установки:

$$A \le \frac{4,5 + \frac{2,6}{V}\sum\left(g_{ki} \cdot a_{ki}^0\right) - 0,431\frac{N}{N_н}}{1 + \frac{10}{VA_t}\sum\left(g_{ki} \cdot a_{ki}^0\right)}. \quad (6)$$

Величина абсолютной влажности газоизоляции A (6) в момент проведения измерений A_t при t = 20 °C не должна превышать величину расчетной абсолютной влажности газоизоляции в конце срока службы газонаполненного элегазового оборудования $N_н$, что характеризует соотношение:

$$A_{изм} = \frac{4,5 + \frac{2,6}{V}\sum\left(g_{ki} \cdot a_{ki}^0\right) - 0,431\frac{N}{N_н}}{1 + \frac{10}{VA_t}\sum\left(g_{ki} \cdot a_{ki}^0\right)} <$$

$$< 4,5 \cdot V + 2,6\sum\left(g_{ki} \cdot a_{ki}^0\right). \quad (7)$$

Таким образом, была выведена формула (6), характеризующая величину абсолютной влажности газоизоляции $A_{изм}$ участка токопровода объемом V при влажности A_t в момент проведения измерений N, соответствующая п. 8.1 [3]. Эта формула позволяет определить фактическую величину влажности газоизоляции SF_6, при которой будет выполнено условие расчетной влажности SF_6 в конце срока эксплуатации $N_н$ элегазового оборудования относительно момента проведения измерений (7).

При превышении величиной $A_{изм}$ соотношения (7), единственным возможным способом сохранения уровня влажности в контролируемом элегазонаполненном объеме V к концу срока службы $N_н$, заявленного заводом-изготовителем, будет уменьшение величины абсолютной влажности газоизоляции, то есть будет требоваться осушение SF_6.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Результатом исследования стал вывод формулы (6), которая характеризует величину абсолютной влажности $A_{изм}$ газоизоляции в герметичном объеме SF_6, которая удовлетворяет [3], а также соотношение (7), согласно которому величина абсолютной влажности SF_6 в момент измерений не должна превышать величину расчетной абсолютной влажности SF_6 к концу сроку эксплуатации элегазонаполненного оборудования, заявленного заводом-изготовителем.

Величина влажности газоизолированного элегазонаполненного электротехнического оборудования состоит из суммы влажности изолирующего материала и влаги, которая попадает в герметичный сосуд диффузионным путем через резиноуплотнения и неплотности фланцевых соединений в течение всего срока эксплуатации оборудования. Однако, фактическая величина влажности, попадающая в герметичный объем с SF_6, ограничивается лимитом на уплотнения, регламентируемым в [3], и увеличивается в зависимости от срока эксплуатации элегазонаполненного оборудования.

При превышении величины абсолютной влажности $A_{изм}$ в момент измерений (при условии, что срок момента измерений относительно даты изготовления оборудования не превышает срок службы оборудования, заявленного заводом-изготовителем) величины расчетной абсолютной влажности газоизоляции к концу срока службы оборудования, единственным вариантом уменьшения величины абсолютной влажности A будет уменьшение величины влажности изоляционного материала при сохранении его массы g_{ki}, иначе говоря, – потребуется осу-

шение SF_6 в рассматриваемом объеме V, до величины влажности $А_{изм}$, удовлетворяющей (7).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Элегаз используется в электрооборудовании КРУЭ в качестве газоизоляции, и по сравнению с другими газами SF_6 обладает рядом преимуществ. Однако, увлажнение газоизоляции SF_6 может привести к ухудшению диэлектрических свойств элегазонаполненного электрооборудования.

Величина абсолютной влажности является нормируемым параметром и составляет сумму влажности газоизоляции и влажности, попадающей в герметичный элегазонаполненный объем в течение всего срока эксплуатации оборудования.

Выведенные в данном исследовании формулы позволяют определить величину абсолютной влажности газоизоляции SF_6 в момент измерения, а при ее превышении величины расчетной абсолютной влажности газоизоляции SF_6 к концу срока службы оборудования, заявленного заводом-изготовителем, единственным способом сохранения соотношения (7) является осушение всей массы газоизоляции в рассматриваемом объеме.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ Р 54426-2011 (МЭК 60480: 2004). Руководство по проверке и обработке элегаза (SF_6), взятого из электрооборудования, и технические требования к его повторному использованию. Москва : Стандартинформ, 2014. 23 с.
2. ТУ 6-02-1249-83 с Изменениями 1-6. Элегаз промышленной чистоты. Москва : АО «ГалоПолимер Пермь», ООО «ГалоПолимер Кирово-Чепецк». URL https://halopolymer.ru/upload/iblock/53d/fpn2x83sitjhnaseo8xcf1ihzj6a9tf7.pdf (дата обращения 10.11.2025).
3. РД 16-066-05. Элегазовое электротехническое оборудование. Технические требования к производству для обеспечения качества элегаза в оборудовании и меры обеспечения санитарно-гигиенической и экологической безопасности. Технические требования к производству и методы контроля для обеспечения качества элегаза. Москва : СПО ОРГРЭС, 2004. 44 с.
4. CAPIEL-UNIPEDE, Does SF_6 contribute to the greenhouse effect? // 2nd European Conference on Industrial Electrical Equipment and Environment (MEIE), Jan. 2000. Paris.
5. Rodhe, H. A. Comparison of the contribution of various gases to the greenhouse effect // Science. 1990. Vol. 248. pp. 1217 – 1219.
6. Report of CIGRE WG 23.10. SF_6 and the Global Atmosphere // Electra. 1996. № 164. pp.121 – 132.
7. Prakash K.S., Srivastava K.D., Morcos M.M. Movement of Particles in Compressed SF_6 GIS with Dielectric Coated Enclosure // IEEE Trans. On Dielectric and Electrical Insul. 1997. Vol. 4, No 3. pp. 344– 347.
8. ИКЭС-ПР-051-2017. Правила техники безопасности при эксплуатации элегазового оборудования. Документ утвержден Электроэнергетическим Советом Содружества Независимых Государств (Протокол №51 от 4 ноября 2017 года). Москва, 2017.
9. Аракелян, В.Г. Анализ состояния влаги в элегазовом электрооборудовании. // Электротехника. 1993. № 9-10. С. 32-35.
10. Афонин, В.В., Набатов К.А. Элегазовые выключатели распределительных устройств высокого напряжения: учебное пособие. Тамбов : Тамб. гос. техн. ун-та, 2009. 96 с. 100 экз. ISBN 978-5-8265-0797-1.
11. Гохберг, Б.М. Элегаз – электрическая газовая изоляция // Электричество. 1947. № 3. С.15 – 19.
12. Кох, Д. Свойства SF_6 и его использование в коммутационном оборудовании среднего и высокого напряжения // Schneider Electric. 006. Вып. 2.
13. Кучинский Г.С., Кизеветтер В.Е., Пинталь Ю.С. Изоляция установок высокого напряжения: Учебник для вузов / Под общ. ред. Г.С. Кучинского. Москва : Энергоатомиздат, 1987. 368 с.
14. Марюшко, Е. А. Метод экспресс-диагностики комплектных элегазовых распределительных устройств по характеристикам частичных разрядов: специ-

альность 05.14.12 "Техника высоких напряжений": диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Марюшко Егор Андреевич; ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет». Новосибирск, 2017. 163 с.

15. Вариводов В.Н., Ковалев Д.И., Крупенин Н.В., Хренов С.И. Развитие распределительных устройств высокого и сверхвысокого напряжения // Электроэнергия. Передача и распределение. 2017. № 1(40). С. 98-104.

REFERENCES

1. GOST R 54426-2011 (IEC 60480: 2004). Guidelines for testing and processing of SF_6 gas taken from electrical equipment and technical requirements for its reuse. Moscow : Standartinform Publishing House, 2014. 23 p.
2. TU 6-02-1249-83 with Amendments 1-6. Industrial purity SF_6 gas. Moscow: JSC HaloPolymer Perm, LLC HaloPolymer Kirovo-Chepetsk. URL https://halopolymer.ru/upload/iblock/53d/fpn2x83sitjhnaseo8xcf1ihzj6a9tf7.pdf (accessed 10.11.2025).
3. RD 16-066—05. Gas-insulated electrical equipment. Technical requirements for production to ensure the quality of SF_6 gas in equipment and measures to ensure sanitary, hygienic and environmental safety. Technical requirements for production and control methods to ensure the quality of SF_6 gas. Moscow: SPO OR-GRES, 2004. 44 p.
4. CAPIEL-UNIPEDE, Does SF_6 contribute to the greenhouse effect? // 2nd European Conference on Industrial Electrical Equipment and Environment (MEIE), Jan. 2000. Paris.
5. Rodhe, H. A. Comparison of the contribution of various gases to the greenhouse effect // Science. 1990. Vol. 248. pp. 1217 – 1219.
6. Report of CIGRE WG 23.10. SF_6 and the Global Atmosphere // Electra. 1996. № 164. pp.121 – 132.
7. Prakash K.S., Srivastava K.D., Morcos M.M. Movement of Particles in Compressed SF_6 GIS with Dielectric Coated Enclosure // IEEE Trans. On Dielectric and Electrical Insul. 1997. Vol. 4, No 3. pp. 344– 347.
8. ICS-PR-051-2017. Safety regulations for the operation of gas-insulated equipment. Document approved by the Electric Power Council of the Commonwealth of Independent States (Minutes № 51 of November 4, 2017). Moscow, 2017.
9. Arakeljan, V.G. Analysis of the moisture state in gas-insulated electrical equipment. // Electrical engineering. 1993. № 9-10. P. 32-35.
10. Afonin, V.V., Nabatov K.A. SF_6 circuit breakers of high-voltage switchgear: a tutorial. Tambov : Publishing house of Tambov state technical university, 2009. 96 p. 100 copies. ISBN 978-5-8265-0797-1.
11. Gokhberg, B.M. Elegas – electrical gas insulation // Electricity. 1947. № 3. P.15–19.
12. Koch, D. Properties of SF_6 and its use in medium and high voltage switching equipment // Schneider Electric. 2006. Issue 2.
13. Kuchinsky G.S., Kizevetter , V.E., Pintal Yu.S. Insulation of high-voltage installations: Textbook for universities / Under the general editorship of G.S. Kuchinsky. Moscow : Energoatomizdat, 1987. 368 p.
14. Maryushko, E. A. Method of express diagnostics of complete gas-insulated switchgear based on partial discharge characteristics: specialty 05.14.12 "High Voltage Engineering": dissertation for the degree of candidate of technical sciences / Maryushko Egor Andreevich; Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Novosibirsk State Technical University". Novosibirsk, 2017. 163 p.
15. Varivodov V.N., Kovalev D.I., Krupenin N.V., Khrenov S. I. Development of high and extra-high voltage switchgear // Electric Power. Transmission and Distribution. 2017. № 1 (40). P. 98-104.