

# МЕТОДЫ И ПРИБОРЫ КОНТРОЛЯ И ДИАГНОСТИКИ МАТЕРИАЛОВ, ИЗДЕЛИЙ, ВЕЩЕСТВ И ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ



УДК 621.316.542:66.076.5

DOI:10.30724/1998-9903-2024-26-4-3-16

## АНАЛИЗ КОЛИЧЕСТВА ПОТРЕБЛЕНИЯ SF<sub>6</sub> И CF<sub>4</sub> ДЛЯ ЗАПРАВКИ КОММУТАЦИОННОЙ АППАРАТУРЫ ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ

Заленская Н.Ю., Макаренко Ф.В., Заревич А.И., Полуэктов А.В.

Воронежский Государственный Лесотехнический Университет имени  
Г.Ф. Морозова, г. Воронеж, Россия  
phillipp@mail.ru

**Резюме:** АКТУАЛЬНОСТЬ исследования заключается в устранении возможной ошибки при поставках баллонов с гексафторидом серы (Элегаз) и баллонов с тетрафторидом углерода (Фреон R-14) на высоковольтные подстанции для заправки коммутационных аппаратов таких как высоковольтные выключатели, трансформаторы напряжения и др. ЦЕЛЬ. Провести анализ вероятных ошибочных поставок двух вышеупомянутых газов на подстанции. Сделать анализ возможных остатков (или недопоставок) баллонов с газами после заправки. Сделать предположение о причинах появления возможных остатков. Дать рекомендации по преодолению возможных проблем. Произвести соответствующие расчеты. Предложить формулу (таблицу) пересчёта расхода обоих типов газов. Сделать таблицу расчёта реальных значений количества поставляемых баллонов, связанных с дискретностью объёмов баллонов и самих коммутационных аппаратов. Сделать соответствующие выводы, дать рекомендации. МЕТОДЫ. При решении поставленной цели применялся метод расчета состояния идеального газа программными средствами для работы с электронными таблицами (такими как: Excel, Calc и т.п.). РЕЗУЛЬТАТЫ. В статье отражена актуальность темы, рассмотрены особенности (заправка «самотёком») заправки высоковольтного элегазового оборудования в различных климатических условиях (главным образом ниже минус 40-45°C). Проведён анализ типичных типоминалов высоковольтных выключателей, применяемых на высоковольтных подстанциях. Представлен график пересчёта молярной доли (вносящей вклад по давлению) газов в массовую долю. Представлен выборочный расчёт количества баллонов для двух часто встречающихся объёмов коммутационных аппаратов и сорокалитровых баллонов с газами (SF<sub>6</sub> и CF<sub>4</sub>) для нескольких стандартных коэффициентов заполнения баллонов. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Представлены предположительные умозаключения относительно оценки реальных ошибок при отправке баллонов с газами для заправки коммутационных аппаратов. Статья предлагает понимание последовательности проблем, связанных с неправильным расчётом и полную методику расчёта правильных объёмов (массы) газа в зависимости от реальных типов применяемых элегазово-хладонных (для элегазово-азотных методика тоже применима) аппаратов (той или иной фирмы) в зависимости от объёмов поставок единиц оборудования.

**Ключевые слова:** гексафторид серы; тетрафторид углерода; двухатомный азот; коммутационные аппараты; заполнение газом высоковольтных аппаратов; уравнение состояния идеального газа.

**Благодарности:** Авторы благодарны базовой кафедре Технического и программного обеспечения вычислительных и информационных систем за поддержку в работе над настоящей статьёй.

**Для цитирования:** Заленская Н.Ю., Макаренко Ф.В., Заревич А.И., Полуэктов А.В. Анализ количества потребления SF<sub>6</sub> и CF<sub>4</sub> для заправки коммутационной аппаратуры высокого напряжения // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2024. Т.26. № 4. С. 3-16. doi:10.30724/1998-9903-2024-26-4-3-16.

## ANALYSIS OF SF<sub>6</sub> AND CF<sub>4</sub> CONSUMPTION FOR REFUELING HIGH-VOLTAGE SWITCHING EQUIPMENT

Zalenskaya N.Yu., Makarenko Ph.V., Zarevich A.I., Poluektov A.V.

Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov,  
Voronezh, Russia  
phillipp@mail.ru

**Abstract:** The article describes to eliminate possible errors in the supply of cylinders with sulfur hexafluoride and cylinders with carbon tetrafluoride to high-voltage substations for refueling switching devices such as high-voltage switches, voltage transformers, etc. Conduct an analysis of possible erroneous supplies of the two above-mentioned gases at the substation. Make an analysis of possible residuals (or shortfalls) of gas cylinders after refilling. Make an assumption about the reasons for the appearance of possible residues. Give recommendations for overcoming possible problems. Make the appropriate calculations. Propose a formula (table) for recalculating the consumption of both types of gases. Make a table for calculating the actual values of the number of supplied cylinders, related to the discreteness of the volumes of the cylinders and the switching devices themselves. Draw appropriate conclusions and make recommendations. To achieve this goal, a method was used to calculate the state of an ideal gas using software for working with spreadsheets. The article reflects the relevance of the topic and discusses the features of refueling high-voltage SF<sub>6</sub> equipment in various climatic conditions (below minus 40-49°F). An analysis of typical ratings of high-voltage switches used at high-voltage substations was carried out. A graph is presented for converting the molar fraction (contributing to pressure) of gases into the mass fraction. A sample calculation of the number of cylinders is presented for two commonly encountered volumes of switching devices and forty-liter gas cylinders for several standard cylinder filling ratios. Presumptive conclusions are presented regarding the assessment of real errors when sending gas cylinders for refilling switching devices. The article offers an understanding of the sequence of problems associated with incorrect calculations and a complete methodology for calculating the correct volumes (mass) of gas depending on the actual types of devices used, depending on the volume of supplies pieces of equipment.

**Keywords:** sulfur hexafluoride; carbon tetrafluoride; diatomic nitrogen; switching devices; gas filling of high-voltage devices; equation of state of an ideal gas.

**Acknowledgments:** The authors are grateful to the basic department of Technical and software computing and information systems for their support in working on this article.

**For citation:** Zalenskaya N.Yu., Makarenko Ph.V., Zarevich A.I., Poluektov A.V. Analysis of SF<sub>6</sub> and CF<sub>4</sub> consumption for refueling high-voltage switching equipment. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2024; 26 (4): 3-16. doi:10.30724/1998-9903-2024-26-4-3-16.

### **Введение и литературный обзор (Introduction and Literature Review)**

Высоковольтные коммутационные аппараты (в т.ч. выключатели) применяются для включения и, главным образом, для отключения (принудительного дугогашения) высоковольтной линии электропередач, для регулирования электроснабжения и для экстренного отключения оборудования при аварийных ситуациях [1, 2]. Существуют различные типы таких аппаратов, в частности, это воздушные, масляные, вакуумные и элегазовые выключатели [3]. Последние обладают рядом неоспоримых преимуществ:

- применение на классы напряжений свыше 1 кВ;
- пожаро- и взрывобезопасность;
- высокая скорость и как следствие высокая отключающая способность;
- надёжное отключение малых индуктивных и ёмкостных токов в момент

перехода тока через ноль без среза и возникновения перенапряжений;

– дугогашение осуществляется в замкнутом пространстве и без выхлопа в окружающую среду;

– относительно малые массогабаритные характеристики.

– малый износ дугогасительных контактов [4].

Высоковольтные элегазовые выключатели по своей конструкции похожи на масляные, но отличием является то, что для гашения дуги применяется газовая среда [5] (чистый гексафторид серы, иногда его смесь с двухатомным азотом или тетрафторидом углерода), а не масло. Масляные выключатели требуют пристального внимания, связанного с необходимостью замены масла и очисткой механических контактов. Преимущество использования газовой среды заключается в отсутствии эффекта загрязнения контактных устройств [6, 7].

Существует два основных типа элегазовых выключателей: баковые и колонковые. Баковые выключатели имеют дугогасительную камеру в металлическом корпусе, который постоянно заземлён. Дугогасительная же камера колонковых выключателей заключена в изолированном керамическом корпусе. Отличительные особенности данных приборов неоднократно описывались в различных источниках [2, 3, 8], и в настоящей статье мы не будем на этом останавливаться.

Согласно нормативным документам [9, 10] при температурах окружающей среды ниже минус 45 °С при избыточных давлениях порядка 5-8 атмосфер чистый элегаз начинает переходить в жидкую фазу, что катастрофически снижает дугогасительные свойства коммутационных аппаратов, делая невозможным их применение. Для баковых выключателей существует два способа преодоления этого препятствия: применение подогрева дугогасительной камеры или использование смеси инертных газов, переходящих в жидкое состояние при более низких температурах. Для колонковых выключателей такого выбора нет, и возможно применение только газосмеси [11].

На практике, согласно декларациям [12, 13, 14], применяется элегазовые смеси двух типов: SF<sub>6</sub>+N<sub>2</sub> и SF<sub>6</sub>+CF<sub>4</sub> (с различным соотношением газов). Приведём наиболее часто встречающиеся.

Таблица 1

Table 1

Задекларированные соотношения смесей газов, применяемых в различных типах высоковольтных аппаратов разных производителей

*Declared ratios of gas mixtures used in different types of high-voltage apparatus from different manufacturers*

Элегаз и Хладон-14	Элегаз и Азот
SF <sub>6</sub> -25% и CF <sub>4</sub> -75% (до -60°C)	SF <sub>6</sub> -30% и N <sub>2</sub> -70% (до -55°C)
SF <sub>6</sub> -30% и CF <sub>4</sub> -70% (до -55°C)	SF <sub>6</sub> -35% и N <sub>2</sub> -65% (до -60°C)
SF <sub>6</sub> -34% и CF <sub>4</sub> -66% (до -50°C)	SF <sub>6</sub> -40% и N <sub>2</sub> -60% (до -60°C)
SF <sub>6</sub> -35% и CF <sub>4</sub> -65% (до -55°C)	SF <sub>6</sub> -44,3% и N <sub>2</sub> -55,7% (до -55°C)
SF <sub>6</sub> -36% и CF <sub>4</sub> -64% (до -50°C)	SF <sub>6</sub> -51% и N <sub>2</sub> -49% (до -50°C)
SF <sub>6</sub> -40% и CF <sub>4</sub> -60% (до -55°C)	SF <sub>6</sub> -53% и N <sub>2</sub> -47% (до -50°C)
SF <sub>6</sub> -43% и CF <sub>4</sub> -57% (до -55°C)	SF <sub>6</sub> -60% и N <sub>2</sub> -40% (до -45°C)
SF <sub>6</sub> -44,3% и CF <sub>4</sub> -55,7% (до -55°C)	—
SF <sub>6</sub> -45% и CF <sub>4</sub> -55% (до -50°C)	—
SF <sub>6</sub> -50% и CF <sub>4</sub> -50% (до -52°C)	—
SF <sub>6</sub> -51% и CF <sub>4</sub> -49% (до -50°C)	—

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Как видим из таблицы 1, соотношение элегаза в смесях варьируется (грубо) от 60% до 25%. Температурный разброс связан с использованием разного избыточного давления газосмеси в разных типах коммутационных аппаратов (различные механические особенности разных фирм-производителей). Отметим, что при уменьшении содержания элегаза можно добиться желаемой работоспособности аппаратов при более низких температурах. Однако, дугогасительные свойства хладона и азота ниже, чем у элегаза, и полностью исключить последний не представляется возможным.

Практика организации поставок количества баллонов [15] с разными заправочными газами говорит о часто встречающихся случаях нехватки SF<sub>6</sub> и избытке CF<sub>4</sub>. Но с чем же может быть связана эта проблема?

Для этого кратко опишем часто встречающуюся «методику» расчёта необходимого количества баллонов. Для определения «количества» газа руководители производства взвешивают сначала пустые баллоны (или берут эту информацию из технического паспорта изделия), затем взвешивают заполненный первым видом газа баллон. Вычитают вес пустого баллона из веса заполненного и делают вывод о массе газа номер 1. Таким же образом, измеряют (вычисляют) массу газа номер 2. Затем, берут номинальные соотношения газов из руководства по эксплуатации, умножают на соответствующий коэффициент и рассчитывают количества баллонов для двух типов газов. Такой поспешный подход, разумеется, приводит к серьёзным ошибкам, и как следствие, к серьёзным проблемам. Чтобы избежать рекламаций, связанных с недопоставкой элегаза на подстанции, руководители повышают процент всех поставляемых баллонов до 20%. Как результат, элегаза становится достаточно, а вот второй газ поставляется в переизбытке (в двойном количестве).

Остановимся на рассмотрении CF<sub>4</sub>, как наиболее часто применяемого в качестве второго газа. Анализ [12, 13] позволяет выявить наиболее часто встречающиеся на практике (на подстанциях) объёмы высоковольтных коммутационных аппаратов.

В таблице 2 мы приведём пример возможного ошибочного расчёта для случая соотношения газов SF<sub>6</sub>-36% и CF<sub>4</sub>-64% (где это соотношение неправильно понималось как соотношение масс, а не числа частиц газа).

Таблица 2  
Table 2

Массовые доли газов при различных объёмах аппаратов  
*Mass fractions of gases at different apparatus volumes*

V, л	m <sub>SF<sub>6</sub></sub> , кг (5,9 атм. изб. давл.)	m <sub>SF<sub>6</sub>/CF<sub>4</sub></sub> , кг (7,4 атм. изб. давл., полагая, что 36%/64% - массовая доля)	m <sub>1 SF<sub>6</sub></sub> , кг (в смеси)	m <sub>2 CF<sub>4</sub></sub> , кг (в смеси)
90	4,16	3,56	1,28	2,28
150	6,93	5,94	2,14	3,80
180	8,32	7,14	2,57	4,57
190	8,78	7,54	2,71	4,83
210	9,71	8,32	2,99	5,33
300	13,9	11,8	4,25	7,55
450	20,8	17,9	6,44	11,5
500	23,1	19,8	7,13	12,7
520	24,1	20,6	7,42	13,2
580	26,8	23,0	8,28	14,7
740	34,2	29,3	10,5	18,8
800	36,9	31,7	11,4	20,3
940	43,4	37,2	13,4	23,8
960	44,4	38,1	13,7	24,4
1100	50,8	43,6	15,7	27,9
1160	53,6	45,9	16,5	29,4
1260	58,2	49,9	18,0	31,9
1300	60,1	51,5	18,6	32,9
1400	64,7	55,5	19,9	35,6
1500	69,3	59,4	21,4	38,0
1600	73,9	63,4	22,8	40,6
3400	157	135	48,6	86,4
3800	176	151	54,4	96,6
4600	213	183	65,9	117
15800	730	626	225	401

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Цель настоящего исследования заключается в устранении вышеописанной ошибки и предложении правильной методики расчёта количества необходимого газа и, что более сложно, методики расчёта количества баллонов, содержащих газы.

Научная значимость исследования состоит в подтверждение возможности

применения на практике уравнения состояния идеального газа.

Практическая значимость исследования заключается в экономии средств предприятия, связанных ограничением избытка поставок газа и исключением возможных рекламаций.

**Материалы и методы (Materials and methods)**

**Уравнение состояния идеального газа. Дискретное распределение газов по баллонам**

Как было отмечено выше, причиной возможной ошибки является ошибочное суждение, что на давление, создаваемое в камере, влияет масса газа. Однако, давление в камере определяется количеством молекул (молей) газа, а не массой (или весом, который измеряется на практике). Ниже приведём уравнение равнение Клапейрона-Менделеева.

$$PV = \frac{m}{M} \cdot RT \tag{1}$$

где  $m$  – масса газа;

$M$  – масса одного моля газа;

$m/M$  – число молей газа;

$P$  – давление газа (в атм.);

$V$  – объём газа (в литрах);

$T$  – температура газа (в кельвинах);

$R$  – газовая постоянная (0,0821 л· атм. /моль·К).

Для смеси газов, это уравнение примет вид:

$$PV = \left( \frac{m_{SF6}}{M_{SF6}} + \frac{m_{CF4}}{M_{CF4}} \right) \cdot RT \tag{2}$$

где  $m_{SF6}$  – масса элегаза;

$m_{CF4}$  – масса хладона-14;

$M_{SF6}$  – молярная масса элегаза (0,146 кг/моль);

$M_{CF4}$  – молярная масса хладона-14 (0,088 кг/моль);

$m_{SF6}/M_{SF6}$  – число молей элегаза;

$m_{CF4}/M_{CF4}$  – число молей хладона-14;

$P$  – давление газа (в атм.);

$V$  – объём газа (в литрах);

$T$  – температура газа (в кельвинах);

$R$  – газовая постоянная (0,0821 л· атм. /моль·К).

Взяв фиксированное значение объёма, давления и температуры можно варьировать соотношением массы газов от 0% /100% до 100% /0% и, зная молярные массы газов, смотреть как меняется их процентное соотношение по количеству молекул, которое как раз и влияет на создаваемое давление. В результате, можно получить график пересчёта (см. рис.1).

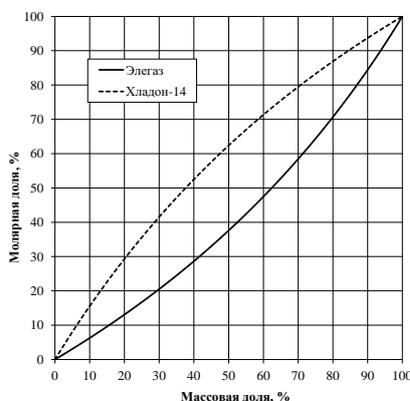


Рис. 1. График пересчёта молярной доли газов в массовую долю газов Fig. 1. Graph for converting molar fraction of gases to mass fraction of gases

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

График (рис. 1) позволяет пересчитать соотношение молекул (молей) которое, как раз, и вносит вклад в создание давления в камере, в соотношение газов по их массе, которое может быть измерено путём взвешивания.

Другой важной проблемой является дискретность распределения газов, связанная с фиксированным значением газов в баллонах и количеством и номиналом самих высоковольтных аппаратов, что осложняет расчёт количества необходимых поставляемых баллонов с газами для подстанции. Такая задача решается частным образом, в зависимости от конкретных габаритно-количественных параметров баллонов и аппаратов. Однако, для некоторых случаев мы приведём такие итерационные расчёты.

**Результаты (Results)**

Применяя график пересчёта (рис. 1), покажем для типичных значений из таблицы 1 (колонка 1) какое должно быть соотношение газов по массе.

Таблица 3  
Table 3

Пересчёт типичных молярных соотношений в массовые  
Conversion of typical molar ratios to mass ratios

Элегаз и Хладон-14 (молярная доля)	Элегаз и Хладон-14 (массовая доля)
SF <sub>6</sub> -25% и CF <sub>4</sub> -75%	SF <sub>6</sub> -35% и CF <sub>4</sub> -65%
SF <sub>6</sub> -30% и CF <sub>4</sub> -70%	SF <sub>6</sub> -42% и CF <sub>4</sub> -58%
SF <sub>6</sub> -34% и CF <sub>4</sub> -66%	SF <sub>6</sub> -46% и CF <sub>4</sub> -54%
SF <sub>6</sub> -35% и CF <sub>4</sub> -65%	SF <sub>6</sub> -47% и CF <sub>4</sub> -53%
SF <sub>6</sub> -36% и CF <sub>4</sub> -64%	SF <sub>6</sub> -48% и CF <sub>4</sub> -52%
SF <sub>6</sub> -40% и CF <sub>4</sub> -60%	SF <sub>6</sub> -53% и CF <sub>4</sub> -47%
SF <sub>6</sub> -43% и CF <sub>4</sub> -57%	SF <sub>6</sub> -56% и CF <sub>4</sub> -44%
SF <sub>6</sub> -44,3% и CF <sub>4</sub> -55,7%	SF <sub>6</sub> -57% и CF <sub>4</sub> -43%
SF <sub>6</sub> -45% и CF <sub>4</sub> -55%	SF <sub>6</sub> -58% и CF <sub>4</sub> -42%
SF <sub>6</sub> -50% и CF <sub>4</sub> -50%	SF <sub>6</sub> -62% и CF <sub>4</sub> -38%
SF <sub>6</sub> -51% и CF <sub>4</sub> -49%	SF <sub>6</sub> -63% и CF <sub>4</sub> -37%

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Используя вновь уравнение (2), представим результат расчёта необходимой массы газов для поддержания номинального давления 7,4 атм. избыточного давления (или 8,4 атм. абсолютного давления в камере) с соблюдением номинального наиболее часто встречающегося (36%/64%) молярного соотношения для типичных объёмов коммутационных аппаратов (табл. 2).

Таблица 4  
Table 4

Правильный расчёт массы и массовых долей газов при различных объёмах аппаратов  
Correct calculation of mass and mass fractions of gases for different apparatus volumes

V, л	m <sub>SF<sub>6</sub></sub> , кг (5,9 атм. изб. давл.)	m <sub>SF<sub>6</sub>/CF<sub>4</sub></sub> , кг (7,4 атм. изб. давл., при молярной доле 36%/64% при массовой доле 48%/52%)	m <sub>1 SF<sub>6</sub></sub> , кг (в смеси)	m <sub>2 CF<sub>4</sub></sub> , кг (в смеси)
90	4,16	3,76	1,81	1,95
150	6,93	6,27	3,01	3,26
180	8,32	7,52	3,61	3,91
190	8,78	7,94	3,81	4,13
210	9,71	8,77	4,21	4,56
300	13,9	12,6	6,05	6,55
450	20,8	18,8	9,02	9,78
500	23,1	20,9	10,1	10,8
520	24,1	21,7	10,4	11,3
580	26,8	24,2	11,6	12,6
740	34,2	30,9	14,8	16,1
800	36,9	33,4	16,1	17,3

940	43,4	39,3	18,9	20,4
960	44,4	40,1	19,2	20,9
1100	50,8	45,9	22,1	23,8
1160	53,6	48,4	23,2	25,2
1260	58,2	52,6	25,2	27,4
1300	60,1	54,3	26,1	28,2
1400	64,7	58,4	28,1	30,3
1500	69,3	62,7	30,1	32,6
1600	73,9	66,8	32,1	34,7
3400	157	142	68,2	73,8
3800	176	159	76,3	82,7
4600	213	192	92,2	99,8
15800	730	660	317	343

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Если сравнить неправильные значения из таблицы 2 и скорректированные из таблицы 4, можно отметить, что общая масса смеси увеличивается на 5,6%, и молярное соотношение 36%/64% меняется на массовое соотношение 48%/52%.

Теперь представим несколько частных расчётов количества необходимых баллонов с элегазом и хладон-14. На практике чаще всего применяются баллоны [16] объемом 40 л, рассчитанные на 200 атм., с различной степенью заполнения. По массе это бывает 56, 40, 30 и 20 кг (для элегаза) и 29 кг (для хладона-14). Для определения количества целых баллонов необходимо поделить расчётную (для заправки аппаратов на подстанции) массу газа на массу газа в баллоне (за вычетом 2-х кг, т.к. в случае заправки выключателей «самотёком» в баллонах останется до 2 кг неиспользованного газа) и округлить в сторону целого баллона. Тогда, эффективная масса газов будет следующая: 54, 38, 28 и 18 кг (для элегаза) и 27 кг (для хладона-14).

Представим некоторые данные по применяемым баллонам в таблице 5 и таблице 6.

Таблица 5

Table 5

Данные по баллонам с элегазом

Data on gas cylinders

Элегаз при 293 °К				
Объём баллона, л	Типичные массы нетто элегаза, кг	$K_{\text{заполн.}}$ %	Соответствующие им давления, ат (присутствует жидкая фаза), кгс/см <sup>2</sup>	Количество в-ва $m_{\text{SF}_6}/M_{\text{SF}_6}$ , моль
40	56	88	21,44	384
	40	63	21,44	274
	30	47	21,44	206
	20	32	21,44	137

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Таблица 6

Table 6

Данные по баллонам с хладон-14

Data on cylinders with refrigerant-14

Хладон-14 при 293 °К				
Объём баллона, л	Типичная масса нетто хладона, кг	$K_{\text{заполн.}}$ %	Соответствующее ей давление, ат, кгс/см <sup>2</sup>	Количество в-ва $m_{\text{CF}_4}/M_{\text{CF}_4}$ , моль
40	29	92	139,7	330

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Рассмотрим 2 типичных объёма высоковольтных аппаратов 180 л и 520 л для заправки (при молярной доле 36%/64% при массовой доле 48%/52%). Возьмём из таблицы 2 (для старого неправильного представления) и таблицы 4 (с правильным расчётом) значения необходимой массы газов. Рассчитаем расход баллонов элегаза и хладона в случае заправки до 15 шт. каждого типа аппаратов. Для элегаза возьмём из таблицы 5 массы 30 кг и 56 кг (минус 2 кг), и из таблицы 6 массу 29 кг (минус 2 кг). Тогда:

Таблица 7  
Table 7

Расход по баллонам с элегазом (28 кг) для аппаратов с объёмом 180 л  
Consumption by gas cylinders (28 kg) for 180 l apparatuses

Кол-во	m <sub>SF6</sub> , кг (Старый подход)	Нарастающая m <sub>SF6</sub> , кг (Старый подход)	Округление до целых баллонов	m <sub>SF6</sub> , кг (Новый подход)	Нарастающая m <sub>SF6</sub> , кг (Новый подход)	Округление до целых баллонов	НЕДОСТАТОК баллонов элегаза (30-2 кг)	Примечание
1	2,57	2,57	1	3,61	3,61	1	0	
2	2,57	5,14	1	3,61	7,22	1	0	
3	2,57	7,71	1	3,61	10,83	1	0	
4	2,57	10,28	1	3,61	14,44	1	0	
5	2,57	12,85	1	3,61	18,05	1	0	
6	2,57	15,42	1	3,61	21,66	1	0	
7	2,57	17,99	1	3,61	25,27	1	0	
8	2,57	20,56	1	3,61	28,88	2	-1	Рекламация
9	2,57	23,13	1	3,61	32,49	2	-1	Рекламация
10	2,57	25,70	1	3,61	36,10	2	-1	Рекламация
11	2,57	28,27	2	3,61	39,71	2	0	
12	2,57	30,84	2	3,61	43,32	2	0	
13	2,57	33,41	2	3,61	46,93	2	0	
14	2,57	35,98	2	3,61	50,54	2	0	
15	2,57	38,55	2	3,61	54,15	2	0	

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Таблица 8  
Table 8

Расход по баллонам с элегазом (28 кг) для аппаратов с объёмом 520 л  
Consumption of gas cylinders (28 kg) for apparatus with a volume of 520 l

Кол-во	m <sub>SF6</sub> , кг (Старый подход)	Нарастающая m <sub>SF6</sub> , кг (Старый подход)	Округление до целых баллонов	m <sub>SF6</sub> , кг (Новый подход)	Нарастающая m <sub>SF6</sub> , кг (Новый подход)	Округление до целых баллонов	НЕДОСТАТОК баллонов элегаза (30-2 кг)	Примечание
1	7,42	7,42	1	10,4	10,4	1	0	
2	7,42	14,84	1	10,4	20,8	1	0	
3	7,42	22,26	1	10,4	31,2	2	-1	Рекламация
4	7,42	29,68	2	10,4	41,6	2	0	
5	7,42	37,10	2	10,4	52,0	2	0	
6	7,42	44,52	2	10,4	62,4	3	-1	Рекламация
7	7,42	51,94	2	10,4	72,8	3	-1	Рекламация
8	7,42	59,36	3	10,4	83,2	3	0	
9	7,42	66,78	3	10,4	93,6	4	-1	Рекламация
10	7,42	74,20	3	10,4	104,0	4	-1	Рекламация
11	7,42	81,62	3	10,4	114,4	5	-2	Рекламация
12	7,42	89,04	4	10,4	124,8	5	-1	Рекламация
13	7,42	96,46	4	10,4	135,2	5	-1	Рекламация
14	7,42	103,88	4	10,4	145,6	6	-2	Рекламация
15	7,42	111,30	4	10,4	156,0	6	-2	Рекламация

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Таблица 9  
Table 9Расход по баллонам с элегазом (54 кг) для аппаратов с объёмом 180 л  
Consumption by gas cylinders (54 kg) for 180 l apparatuses

Кол-во	м <sup>3</sup> ЭГБ, кг (Старый подход)	Нарастающая м <sup>3</sup> ЭГБ, кг (Старый подход)	Округление до целых баллонов	м <sup>3</sup> ЭГБ, кг (Новый подход)	Нарастающая м <sup>3</sup> ЭГБ, кг (Новый подход)	Округление до целых баллонов	НЕДОСТАТОК баллонов элегаза (56-2 кг)	Примечание
1	2,57	2,57	1	3,61	3,61	1	0	
2	2,57	5,14	1	3,61	7,22	1	0	
3	2,57	7,71	1	3,61	10,83	1	0	
4	2,57	10,28	1	3,61	14,44	1	0	
5	2,57	12,85	1	3,61	18,05	1	0	
6	2,57	15,42	1	3,61	21,66	1	0	
7	2,57	17,99	1	3,61	25,27	1	0	
8	2,57	20,56	1	3,61	28,88	1	0	
9	2,57	23,13	1	3,61	32,49	1	0	
10	2,57	25,70	1	3,61	36,10	1	0	
11	2,57	28,27	1	3,61	39,71	1	0	
12	2,57	30,84	1	3,61	43,32	1	0	
13	2,57	33,41	1	3,61	46,93	1	0	
14	2,57	35,98	1	3,61	50,54	1	0	
15	2,57	38,55	1	3,61	54,15	2	-1	Рекламация

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Таблица 10  
Table 10Расход по баллонам с элегазом (54 кг) для аппаратов с объёмом 520 л  
Consumption by gas cylinders (54 kg) for 520 l apparatuses

Кол-во	м <sup>3</sup> ЭГБ, кг (Старый подход)	Нарастающая м <sup>3</sup> ЭГБ, кг (Старый подход)	Округление до целых баллонов	м <sup>3</sup> ЭГБ, кг (Новый подход)	Нарастающая м <sup>3</sup> ЭГБ, кг (Новый подход)	Округление до целых баллонов	НЕДОСТАТОК баллонов элегаза (56-2 кг)	Примечание
1	7,42	7,42	1	10,4	10,4	1	0	
2	7,42	14,84	1	10,4	20,8	1	0	
3	7,42	22,26	1	10,4	31,2	1	0	
4	7,42	29,68	1	10,4	41,6	1	0	
5	7,42	37,10	1	10,4	52,0	1	0	
6	7,42	44,52	1	10,4	62,4	2	-1	Рекламация
7	7,42	51,94	1	10,4	72,8	2	-1	Рекламация
8	7,42	59,36	2	10,4	83,2	2	0	
9	7,42	66,78	2	10,4	93,6	2	0	
10	7,42	74,20	2	10,4	104,0	2	0	
11	7,42	81,62	2	10,4	114,4	3	-1	Рекламация
12	7,42	89,04	2	10,4	124,8	3	-1	Рекламация
13	7,42	96,46	2	10,4	135,2	3	-1	Рекламация
14	7,42	103,88	2	10,4	145,6	3	-1	Рекламация
15	7,42	111,30	3	10,4	156,0	3	0	

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Таблица 11  
Table 11

Расход по баллонам с хладоном-14 (27 кг) для аппаратов с объёмом 180 л  
Flow rate for cylinders with refrigerant-14 (27 kg) for 180 l apparatuses

Кол-во	m <sub>CF4</sub> , кг (Старый подход)	Нарастающая m <sub>CF4</sub> , кг (Старый подход)	Округление до целых баллонов	m <sub>CF4</sub> , кг (Новый подход)	Нарастающая m <sub>CF4</sub> , кг (Новый подход)	Округление до целых баллонов	Лишние поставляемые баллоны хладоны (29-2 кг)	Примечание
1	4,57	4,57	1	3,91	3,91	1	0	
2	4,57	9,14	1	3,91	7,82	1	0	
3	4,57	13,71	1	3,91	11,73	1	0	
4	4,57	18,28	1	3,91	15,64	1	0	
5	4,57	22,85	1	3,91	19,55	1	0	
6	4,57	27,42	2	3,91	23,46	1	1	Перерасход
7	4,57	31,99	2	3,91	27,37	2	0	
8	4,57	36,56	2	3,91	31,28	2	0	
9	4,57	41,13	2	3,91	35,19	2	0	
10	4,57	45,70	2	3,91	39,10	2	0	
11	4,57	50,27	2	3,91	43,01	2	0	
12	4,57	54,84	3	3,91	46,92	2	1	Перерасход
13	4,57	59,41	3	3,91	50,83	2	1	Перерасход
14	4,57	63,98	3	3,91	54,74	3	0	
15	4,57	68,55	3	3,91	58,65	3	0	

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Таблица 12  
Table 12

Расход по баллонам с хладоном-14 (27 кг) для аппаратов с объёмом 520 л  
Consumption by cylinders with refrigerant-14 (27 kg) for 520 l apparatuses

Кол-во	m <sub>CF4</sub> , кг (Старый подход)	Нарастающая m <sub>CF4</sub> , кг (Старый подход)	Округление до целых баллонов	m <sub>CF4</sub> , кг (Новый подход)	Нарастающая m <sub>CF4</sub> , кг (Новый подход)	Округление до целых баллонов	Лишние поставляемые баллоны хладоны (29-2 кг)	Примечание
1	13,20	13,2	1	11,3	11,3	1	0	
2	13,20	26,4	1	11,3	22,6	1	0	
3	13,20	39,6	2	11,3	33,9	2	0	
4	13,20	52,8	2	11,3	45,2	2	0	
5	13,20	66,0	3	11,3	56,5	3	0	
6	13,20	79,2	3	11,3	67,8	3	0	
7	13,20	92,4	4	11,3	79,1	3	1	Перерасход
8	13,20	105,6	4	11,3	90,4	4	0	
9	13,20	118,8	5	11,3	101,7	4	1	Перерасход
10	13,20	132,0	5	11,3	113,0	5	0	
11	13,20	145,2	6	11,3	124,3	5	1	Перерасход
12	13,20	158,4	6	11,3	135,6	6	0	
13	13,20	171,6	7	11,3	146,9	6	1	Перерасход
14	13,20	184,8	7	11,3	158,2	6	1	Перерасход
15	13,20	198,0	8	11,3	169,5	7	1	Перерасход

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

### **Обсуждение результатов (Discussions)**

В заключении отметим, что полученные значения (табл. 7-12) показывают возможные финансовые потери предприятия-поставщика коммутационных аппаратов. Однако, как их оценить на практике? Вкратце распишем некоторые суждения на этот счёт. Руководитель предприятия, руководствуясь старым ошибочным принципом расчёта количества баллонов поставляемых газов, разумеется, перестраховывается и добавляет к расчётным значениям ещё 10-15 %, однако и для этого случая, если пересчитать табл. 7-12, недопоставки элегаза (рекламации) будут иметь место, а вот перерасход баллонов с хладоном-14 увеличится. Поэтому, после рекламаций руководитель может принять решение о повышении расчётных (неправильно) значений масс газов на 20-25%. Это решение позволит избежать проблем с потребителями, однако, в особенности для проектов с большим числом аппаратов, количество поставляемых баллонов с хладоном-14 будет приближаться к 200% от реально необходимого. Конкретные цифры (проценты) выигрыша от применения правильного расчёта будут зависеть от видов аппаратов и объёмов поставки предприятия, но могут быть весьма существенными.

Таким образом, настоящая статья предлагает решение проблемы в случае неправильного (по массовым долям) расчёта соотношения поставок двух типов газов, применяемых для заправки высоковольтных коммутационных аппаратов в условиях низких температур (ниже  $-45^{\circ}\text{C}$ ). Представленный график пересчёта долей (по давлению или количеству вещества) газов в массовую долю может быть полезен для оптимизации процессов поставок инертных газов [17-18]. Такой подход исключает возможные рекламации со стороны потребителей и экономит средства, за счёт исключения перерасхода.

### **Литература**

1. Ахатов М. М. Высоковольтные выключатели. Элегазовые выключатели / М.М. Ахатов, Д.И. Довгий // EurasiaScience : Сборник статей LVIII международной научно-практической конференции, Москва, 30 декабря 2023 года. – Москва: Общество с ограниченной ответственностью "Актуальность.РФ", 2023. – С. 149-150. – EDN UXQFIB.
2. Абдреев К. А. Вакуумные и элегазовые выключатели как перспектива развития современной высоковольтной энергетики / К.А. Абдреев // Энергетика, управление и автоматизация: инновационные решения проблем : Материалы II Всероссийской научно-практической конференции обучающихся и преподавателей Научное издание, Санкт-Петербург, 22 декабря 2022 года / Под общей редакцией Т.Ю. Коротковой, сост. М.С. Липатов, Е.Н. Лашина. – Санкт-Петербург: Высшая школа технологии и энергетики федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования "Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна", 2023. – С. 225-229. – EDN MDEWGB.
3. Кондрашов, Е. И. Сравнительный анализ элегазовых выключателей / Е. И. Кондрашов, Н. Ю. Шевченко // России – творческую молодёжь : Материалы XV Всероссийской научно-практической студенческой конференции в 4-х томах, Камышин, 20–22 апреля 2022 года / Волгоградский государственный технический университет (Камышинский филиал). Том 4. – Камышин: Волгоградский государственный технический университет, 2022. – С. 59-61. – EDN PTQQNY.
4. Элегазовые выключатели / А. Д. Ермолаев, П. М. Раздымаха, Л. И. Фомин, В. И. Шаферов // Поколение будущего: Взгляд молодых ученых- 2021 : Сборник научных статей 10-й Международной молодежной научной конференции. В 4-х томах, Курск, 11–12 ноября 2021 года / Отв. редактор А.А. Горохов. Том 4. – Курск: Юго-Западный государственный университет, 2021. – С. 228-230. – EDN HNWGBN
5. PTFE Vapor Contribution to Pressure Changes in High-Voltage Circuit Breakers / J.-J. Gonzalez, P. Freton, F. Reichert, A. Petchanka // IEEE Transactions on Plasma Science. 2015. Vol. 43, no. 8. P. 2703–2714. DOI: 10.1109/TPS.2015.2450536
6. Башмаков, Д. А. Повышение надежности ОРУ-110 КВ нч ТЭЦ путем замены маломасляных выключателей на элегазовые / Д. А. Башмаков, З. Г. Сайфутдинов, А. И. Сайфутдинова // Социально-экономические и технические системы: исследование, проектирование, оптимизация. – 2022. – № 3(92). – С. 6-12. – EDN SKJOVS.
7. Краев, А. А. Применение элегаза в качестве основной изоляции в электрических агрегатах / А. А. Краев // ПРОБЛЕМЫ РАЗВИТИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО ПОТЕНЦИАЛА И НАПРАВЛЕНИЯ ЕГО ПОВЫШЕНИЯ : сборник статей по итогам Международной научно-практической конференции, Омск, 09 января 2021 года. – Стерлитамак: Общество с ограниченной ответственностью "Агентство международных исследований", 2021. – С. 27-29. – EDN VDSZFW.

8. Ермолин, В. А. Элегазовые выключатели. Обзор рынка / В. А. Ермолин, А. А. Коршунов // Инновации. Наука. Образование. – 2020. – № 13. – С. 675-686. – EDN LJFVYL.
9. Шульга, Р. Н. Приводы вакуумных и элегазовых выключателей / Р. Н. Шульга // Энергоэксперт. – 2022. – № 2(82). – С. 36-42. – EDN JDXRCH.
10. Александров, М. А. Мониторинг технического состояния элегазовых выключателей / М. А. Александров // Электроэнергетика : Пятнадцатая всероссийская (седьмая международная) научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых: материалы конференции. В 6-ти томах, Иваново, 07–10 апреля 2020 года. Том 3. – Иваново: Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина, 2020. – С. 97. – EDN PCEWTK.
11. Шилов, А. Ю. Повышение надежности работы элегазовых выключателей в условиях экстремально низких температур / А. Ю. Шилов, А. Н. Луценко // Бюллетень научных сообщений. – 2023. – № 28. – С. 71-73. – EDN IWXCZ.
12. Юрьева А.В. Оборудование, материалы и системы, допущенные к применению на объектах ПАО "Россети" 28 декабря 2018. Краснодар; 2018. Доступно по [http://skkpp.ru/wp-content/uploads/2019/02/%D0%90%D1%82%D1%82%D0%B5%D1%81%D1%82%D0%B0%D1%86%D0%B8%D1%8F\\_1\\_28.12.2018.pdf](http://skkpp.ru/wp-content/uploads/2019/02/%D0%90%D1%82%D1%82%D0%B5%D1%81%D1%82%D0%B0%D1%86%D0%B8%D1%8F_1_28.12.2018.pdf) Ссылка активна на 14 марта 2024.
13. Беленький Д.М. Оборудование, материалы и системы, допущенные к применению на объектах ОАО "Россети" 15 января 2015. Москва; 2015. Доступно по <https://www.consultelectro.ru/normbase/download/Pfyl8AA5xyBBNU6?ysclid=ltcrfn0oo7563176750> Ссылка активна на 14 марта 2024.
14. Григорьева Е.Г. Декларация о соответствии 14 апреля 2017. Москва; 2017. Доступно по [https://reestrinform.ru/reestr-declaracii-sootvetstviia/reg\\_number-%D0%A0%D0%9E%D0%A1%D0%A1\\_DE.%D0%9C%D0%9203.%D0%9400233.html](https://reestrinform.ru/reestr-declaracii-sootvetstviia/reg_number-%D0%A0%D0%9E%D0%A1%D0%A1_DE.%D0%9C%D0%9203.%D0%9400233.html) Ссылка активна на 14 марта 2024.
15. Анализ потребления газовых баллонов высокого давления. Москва; 2013. Доступно по <http://www.ballon-torg.ru/prensa.html> Ссылка активна на 14 марта 2024.
16. Final Report of the 2004 - 2007 International Enquiry on Reliability of High Voltage Equipment. Part 5 – Gas Insulated Switchgear (GIS) // CIGRE. – 2012. – pp. 75–87.
17. Callender G., Golosnoy IO., Rapisarda P., et al. Critical analysis of partial discharge dynamics in air filled spherical voids // Journal of Physics D: Applied Physics. 2018. V. 51. N. 12. P. 125601.
18. Sasaki A, Kato S, Takahashii E., Kishimoto Y., et al. Simulation of discharge in insulating gas from initial partial discharge to growth of stepped leader using the percolation model. The Japan Society of Applied Physics. 2016. V. 55. № 2.

#### Авторы публикации

**Заленская Наталия Юрьевна** – преподаватель кафедры «Компьютерных технологий и микроэлектронной инженерии» Воронежского государственного лесотехнического университета имени Г. Ф. Морозова (ВГЛТУ). Email: zalenskayany@vglta.vrn.ru.

**Макаренко Филипп Владимирович** – канд. физ.-мат. наук, доцент базовой кафедры «Технического и программного обеспечения вычислительных и информационных систем» Воронежского государственного лесотехнического университета имени Г. Ф. Морозова (ВГЛТУ). ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-9311-8942> Email: phillipp@mail.ru.

**Заревич Антон Иванович** – канд. техн. наук, доцент базовой кафедры «Технического и программного обеспечения вычислительных и информационных систем» Воронежского государственного лесотехнического университета имени Г. Ф. Морозова (ВГЛТУ). ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-5354-5598> Email: antonzarevich@yandex.ru.

**Полуэктов Александр Владимирович** – преподаватель базовой кафедры «Технического и программного обеспечения вычислительных и информационных систем» Воронежского государственного лесотехнического университета имени Г. Ф. Морозова (ВГЛТУ). ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-4032-5031> Email: palv2006@yandex.ru.

#### References

1. Akhatov MM, Dovgii DI, Vysokovol'tnye vyklyuchateli. Elegazovye vyklyuchateli // EurasiaScience : Sbornik statei LVIII mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii, Moskva, 30 dekabrya 2023 goda. – Moskva: Obshchestvo s ogranichennoi otvetstvennost'yu "Aktual'nost'.RF", 2023. – S. 149-150. – EDN UXQFIB. (In Russ).

2. Abdreev KA. Vakuumnye i elegazovye vyklyuchately kak perspektiva razvitiya sovremennoi vysokovolt'noi energetiki // Energetika, upravlenie i avtomatizatsiya: innovatsionnye resheniya problem : Materialy II Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii obuchayushchikhsya i prepodavatelei Nauchnoe izdanie, Sankt-Peterburg, 22 dekabrya 2022 goda / Pod obshchei redaktsiei T.Yu. Korotkovi, sost. M.S. Lipatov, E.N. Lashina. – Sankt-Peterburg: Vysshaya shkola tekhnologii i energetiki federal'nogo gosudarstvennogo byudzhethnogo obrazovatel'nogo uchrezhdeniya vysshego obrazovaniya "Sankt-Peterburgskii gosudarstvennyi universitet promyshlennykh tekhnologii i dizaina", 2023. – S. 225-229. – EDN MDEWGB. (In Russ).

3. Kondrashov EI., Shevchenko NYu. / Sravnitel'nyi analiz elegazovykh vyklyuchatelei // Rossii – tvorcheskuyu molodezh' : Materialy XV Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi studencheskoi konferentsii v 4-kh tomakh, Kamyshin, 20–22 aprelya 2022 goda / Volgogradskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet (Kamyshinskii filial). Tom 4. – Kamyshin: Volgogradskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet, 2022. – S. 59-61. – EDN PTQQNY. (In Russ).

4. Ermolaev AD., Razdymakha PM., Fomin LI., Shaferov VI. Elegazovye vyklyuchately / Pokolenie budushchego: Vzglyad molodykh uchenykh- 2021 : Sbornik nauchnykh statei 10-i Mezhdunarodnoi molodezhnoi nauchnoi konferentsii. V 4-kh tomakh, Kursk, 11–12 noyabrya 2021 goda / Otv. redaktor A.A. Gorokhov. Tom 4. – Kursk: Yugo-Zapadnyi gosudarstvennyi universitet, 2021. – S. 228-230. – EDN HNWGBN. (In Russ).

5. Gonzalez JJ., Freton P., Reichert F., Petchanka A. / PTFE Vapor Contribution to Pressure Changes in High-Voltage Circuit Breakers // IEEE Transactions on Plasma Science. 2015. Vol. 43, no. 8. P. 2703–2714. DOI: 10.1109/TPS.2015.2450536

6. Bashmakov DA., Saifutdinov ZG., Saifutdinova AI. / Povyshenie nadezhnosti ORU-110 KV nch TETs putem zameny malomaslyanykh vyklyuchatelei na elegazovye // Sotsial'no-ekonomicheskie i tekhnicheskoe sistemy: issledovanie, proektirovanie, optimizatsiya. – 2022. – № 3(92). – S. 6-12. – EDN SKJOVS. (In Russ).

7. Kraev AA. Primenenie elegaza v kachestve osnovnoi izolyatsii v elektricheskikh agregatakh // PROBLEMY RAZVITIYA TEKHNICHESKOGO POTENTIALA i NAPRAVLENIYA EGO POVYSHENIYA : sbornik statei po itogam Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii, Omsk, 09 yanvarya 2021 goda. – Sterlitamak: Obshchestvo s ogranichennoi otvetstvennost'yu "Agentstvo mezhdunarodnykh issledovaniy", 2021. – S. 27-29. – EDN VDSZFW. (In Russ).

8. Ermolin VA., Korshunov AA. / Elegazovye vyklyuchately. Obzor rynka // Innovatsii. Nauka. Obrazovanie. – 2020. – № 13. – S. 675-686. – EDN LJFVYL. (In Russ).

9. Shul'ga RN. Privody vakuumnykh i elegazovykh vyklyuchatelei / R. N. Shul'ga // Energoekspert. – 2022. – № 2(82). – S. 36-42. – EDN JDXRCH. (In Russ).

10. Aleksandrov MA. Monitoring tekhnicheskogo sostoyaniya elegazovykh vyklyuchatelei // Elektroenergetika : Pyatnadsataya vs Rossiiskaya (sed'maya mezhdunarodnaya) nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya studentov, aspirantov i molodykh uchenykh: materialy konferentsii. V 6-ti tomakh, Ivanovo, 07–10 aprelya 2020 goda. Tom 3. – Ivanovo: Ivanovskii gosudarstvennyi energeticheskii universitet im. V.I. Lenina, 2020. – S. 97. – EDN PCEWTK. (In Russ).

11. Shilov AYu., Lutsenko AN. / Povyshenie nadezhnosti raboty elegazovykh vyklyuchatelei v usloviyakh ekstremal'no nizkikh temperatur // Byulleten' nauchnykh soobshchenii. – 2023. – № 28. – S. 71-73. – EDN IWXICZ. (In Russ).

12. Yur'eva AV. Oborudovanie, materialy i sistemy, dopushchennye k primeneniyu na ob'ektakh PAO "Rosseti" 28 dekabrya 2018. Krasnodar; 2018. Available at: [http://skkpp.ru/wp-content/uploads/2019/02/%D0%90%D1%82%D1%82%D0%B5%D1%81%D1%82%D0%B0%D1%86%D0%B8%D1%8F\\_1\\_28.12.2018.pdf](http://skkpp.ru/wp-content/uploads/2019/02/%D0%90%D1%82%D1%82%D0%B5%D1%81%D1%82%D0%B0%D1%86%D0%B8%D1%8F_1_28.12.2018.pdf) Accessed: 14 March 2024. (In Russ).

13. Belen'kii DM. Oborudovanie, materialy i sistemy, dopushchennye k primeneniyu na ob'ektakh OAO "Rosseti" 15 yanvarya 2015. Moskva; 2015. Available at: <https://www.consultelectro.ru/normbase/download/Pfyl8AA5xyBBNU6?ysclid=ltrcfnoo7563176750> Accessed: 14 March 2024. (In Russ).

14. Grigor'eva EG. Deklaratsiya o sootvetstvii 14 aprelya 2017. Moskva; 2017. Available at: [https://reestrinform.ru/reestr-deklaratsii-sootvetstviia/reg\\_number-%D0%A0%D0%9E%D0%A1%D0%A1\\_DE.%D0%9C%D0%9203.%D0%9400233.html](https://reestrinform.ru/reestr-deklaratsii-sootvetstviia/reg_number-%D0%A0%D0%9E%D0%A1%D0%A1_DE.%D0%9C%D0%9203.%D0%9400233.html) Accessed: 14 March 2024. (In Russ).

15. Analiz potrebleniya gazovykh ballonov vysokogo davleniya. Moskva; 2013. Available at: <http://www.ballon-torg.ru/prensa.html> Accessed: 14 March 2024. (In Russ).

16. Final Report of the 2004 - 2007 International Enquiry on Reliability of High Voltage Equipment. Part 5 – Gas Insulated Switchgear (GIS) // CIGRE. – 2012. – pp. 75–87.

17. Callender G., Golosnoy IO., Rapisarda P., et al. Critical analysis of partial discharge dynamics in air filled spherical voids // Journal of Physics D: Applied Physics. 2018. V. 51. N. 12. P. 125601.

18. Sasaki A, Kato S, Takahashii E., Kishimoto Y., et al. Simulation of discharge in insulating gas from initial partial discharge to growth of stepped leader using the percolation model. The Japan Society of Applied Physics. 2016. V. 55. № 2.

#### **Authors of the publication**

**Natalia Yu. Zalenskaya** – Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov (VSUFT), Voronezh, Russia. Email: zalenskayany@vglta.vrn.ru.

**Philipp V. Makarenko** – Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov (VSUFT), Voronezh, Russia. ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-9311-8942> Email: philipp@mail.ru.

**Anton I. Zarevich** – Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov (VSUFT), Voronezh, Russia. ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-5354-5598> Email: antonzarevich@yandex.ru.

**Alexander V. Poluektov** – Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov (VSUFT), Voronezh, Russia. ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-4032-5031> Email: palv2006@yandex.ru.

*Шифр научной специальности: 2.2.8. Методы и приборы контроля и диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды*

**Получено** **16.04.2024 г.**

**Отредактировано** **22.05.2024 г.**

**Принято** **30.05.2024 г.**