

УДК 621.317:621.643

## **УСЛОВИЯ РАБОТЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ИЗОЛЯЦИИ ФЛАНЦЕВЫХ СОЕДИНЕНИЙ ГАЗОПРОВОДОВ ПРИРОДНОГО ГАЗА ПРИ АВАРИЙНЫХ РЕЖИМАХ РАБОТЫ СИСТЕМЫ КАТОДНОЙ ЗАЩИТЫ**

**Ю. А. РУДЧЕНКО, Д. И. ЗАЛИЗНЫЙ**

*Учреждение образования «Гомельский государственный  
технический университет имени П. О. Сухого»,  
Республика Беларусь*

**Ключевые слова:** газоснабжение, фланцевое соединение, изоляция, перенапряжение, электрический пробой.

### **Введение**

Одним из способов электрохимической защиты металлических трубопроводов от коррозии является увеличение их продольного сопротивления с помощью изолирующих фланцевых соединений (ИФС). В соответствии с [1] ИФС устанавливаются, помимо прочего, на вводе газопроводов в здания, где возможен электрический контакт газопровода с землей через металлические конструкции здания и инженерные сети.

За последние пять лет государственными газоснабжающими организациями, входящими в систему ГПО «Белтопгаз», при эксплуатации газораспределительных сетей индивидуального жилого фонда граждан были зафиксированы несколько случаев возгорания жилых домов, обусловленных утечкой газа в ИФС, установленных на вводах газопроводов к этим домам. Одной из причин воспламенения газа в области его утечки можно считать электрический пробой изоляции ИФС, сопровождающийся искрой.

Обзор научных публикаций по данной проблематике [2] показал, что исследования условий пробоя ИФС практически не проводятся. В основном внимание сосредоточено на совершенствовании методов выявления и идентификации повреждений изоляционного покрытия подземных нефтегазопроводов [2], [3].

Вероятными причинами пробоя ИФС могут быть нарушения в работе газораспределительной системы со стороны источника газоснабжения, например, аварийный режим работы станции катодной защиты (СКЗ), а также со стороны потребителя, к примеру, пробой электрической изоляции газовых устройств, имеющих систему электророзжига. Кроме того, пробой изоляции ИФС также вероятен в случаях атмосферных перенапряжений в результате попадания молнии в элементы газораспределительной системы.

Целью работы являлось изучение условий пробоя электрической изоляции фланцевых соединений вводного газопровода [4] при аварийных режимах работы системы катодной защиты.

Исследования проводились в рамках договора РУП «Гомельоблгаз» с государственным предприятием «НИИ Белгипротопгаз» по теме «Исследование электроизоляционных свойств изолирующих фланцевых соединений газопроводов природного газа, находящихся под действием защиты от электрохимической коррозии».

### **Разработка схемы замещения**

Предварительно в ОАО «Минский электротехнический завод имени В. И. Козлова» были проведены электрические испытания ИФС с различными типами изоляции. В результате было установлено, что пробой прокладок из паронита наступает

при напряжении 2,85 кВ, а прокладок из фторопласта при 5,15 кВ (табл. 1). Испытание проводилось повышенным напряжением промышленной частоты.

Таблица 1

**Результаты испытаний изолирующих фланцевых соединений,  
проведенные в ОАО «Минский электротехнический завод имени В. И. Козлова»**

Тип изоляции	Образцы	Величина напряжения пробоя, кВ
Фланцы с прокладкой из фторопласта толщиной 4 мм	Ду-20 (№ 2/396)	5,15
	Ду-25 (№ 2/398)	5,17
	Ду-32 (№ 2/399)	5,30
Фланцы с прокладкой из паронита толщиной 4 мм	Ду-20 (№ 2/396)	2,90
	Ду-25 (№ 2/398)	2,90
	Ду-32 (№ 2/399)	2,85

Для проведения вычислительных экспериментов, имитирующих аномальный режим работы СКЗ, способный привести к электрическому пробое ИФС, авторами была составлена схема замещения участка газораспределительной системы, включающая элементы, оказывающие влияние на условия работы изоляции ИФС.

Рассматриваемый участок газораспределительной сети (рис. 1) включает: СКЗ 1; участок распределительного газопровода низкого давления 2 от СКЗ до места присоединения к нему газопровода-ввода длиной  $l_1$ ; участок газопровода 3 от места присоединения к распределительному газопроводу до ИФС длиной  $l_2$ ; ИФС 4; участок газопровода 5 от ИФС до газоиспользующего устройства длиной  $l_3$ ; газоиспользующее устройство 6.

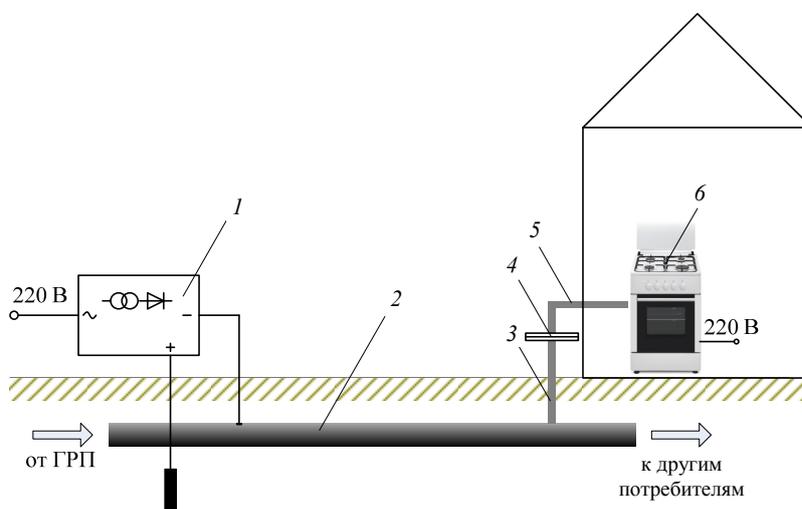


Рис. 1. Функциональная схема газоснабжения жилого дома:  
1 – СКЗ; 2 – распределительный газопровод; 3 – газопровод-ввод; 4 – ИФС;  
5 – вводной газопровод; 6 – газоиспользующее устройство

Рассмотрим аварийный режим работы газораспределительной системы наружно-го газопровода, характеризующийся переходом первичного напряжения понижающего трансформатора станции катодной защиты на вторичную сторону с одновременным пробоем выпрямительных элементов выпрямительной установки.

Будем считать, что при переходе первичного напряжения понижающего трансформатора СКЗ на вторичную сторону, с одновременным пробоем выпрямительных

элементов выпрямительной установки, на стальном газопроводе появится потенциал 220 В относительно земли.

Данный аварийный режим работы газораспределительной системы будет моделироваться схемой замещения, приведенной на рис. 2.

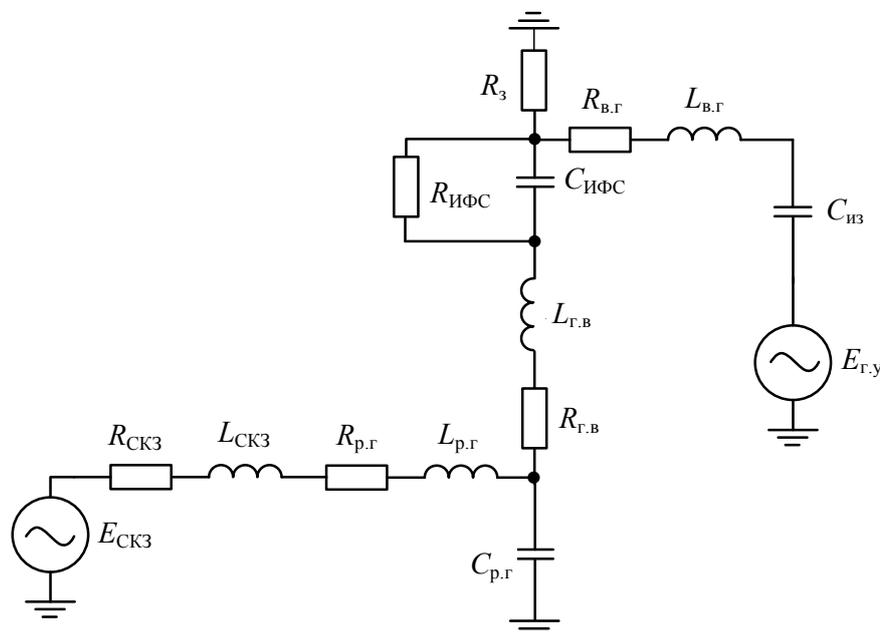


Рис. 2. Схема замещения аварийного режима работы газораспределительной системы

Описание параметров схемы замещения приведено в табл. 2.

Таблица 2

#### Параметры схемы замещения

Параметр	Обозначение
ЭДС, формируемая СКЗ на газопроводе	$E_{СКЗ}$
Активное сопротивление схемы замещения СКЗ	$R_{СКЗ}$
Индуктивность схемы замещения СКЗ	$L_{СКЗ}$
Активное сопротивление распределительного газопровода от точки подключения СКЗ до рассматриваемого ответвления	$R_{р.г}$
Индуктивность распределительного газопровода от точки подключения СКЗ до рассматриваемого ответвления	$L_{р.г}$
Емкость электрически соединенных распределительных газопроводов по отношению к земле	$C_{р.г}$
Активное сопротивление ответвления от распределительного газопровода до точки соединения с ИФС	$R_{Г.в}$
Индуктивность ответвления от распределительного газопровода до точки соединения с ИФС	$L_{Г.в}$
Активное сопротивление ИФС	$R_{ИФС}$
Емкость ИФС	$C_{ИФС}$
Активное сопротивление газопровода от ИФС до газоиспользующих устройств	$R_{в.г}$
Индуктивность газопровода от ИФС до газоиспользующих устройств	$L_{в.г}$
Емкость изоляции газоиспользующих устройств между газопроводом и электрической частью этих устройств	$C_{из}$
ЭДС, прикладываемая к изоляции газоиспользующих устройств по отношению к земле	$E_{Г.у}$
Сопротивление заземления газопровода потребителя	$R_з$

В схеме замещения СКЗ, работающей в аварийном режиме, представим реальным источником ЭДС, внутреннее сопротивление которого, будем предполагать, равно внутреннему сопротивлению электрической сети 0,4 кВ (ориентировочно  $R_{СКЗ} = 0,5 \text{ Ом}$ ,  $L_{СКЗ} = 0,3 \text{ мГн}$ ).

Расчет активных сопротивлений трубопроводов газораспределительной системы  $R_{р.г}$ ,  $R_{г.в}$ ,  $R_{в.г}$  проведем, считая, что они изготовлены из конструкционной стали со значением удельного электрического сопротивления 0,14 мкОм · м [5].

Значения  $L_{р.г}$ ,  $L_{г.в}$ ,  $L_{в.г}$  рассчитаем по формуле для индуктивности полого прямолинейного проводника [6].

При определении параметров схемы замещения участков газопровода примем, что  $l_1$  может изменяться в диапазоне от 1 до 10 км,  $l_2 = 10 \text{ м}$ ,  $l_3 = 10 \text{ м}$ , общая протяженность распределительного газопровода изменяется в диапазоне от 10 до 50 км.

Общую емкость всех электрически соединенных участков распределительного газопровода  $C_{р.г}$  определим как сумму емкостей отдельных газопроводов по формуле цилиндрического конденсатора [7].

Для проведения исследований РУП «Гомельоблгаз» были предоставлены различные образцы изоляции ИФС. Значения  $R_{ИФС}$  и  $C_{ИФС}$  образцов были определены опытным путем с помощью измерителя иммитанса Е7-14. Результаты измерений приведены в табл. 3.

Таблица 3

#### Результаты измерений электрических параметров ИФС

Тип ИФС	Изоляция	Толщина, мм	$C_{ИФС}$ , пФ	$R_{ИФС}$ , МОм
ИФС д. 25	паронит Ду-32	2	1100	1,6
ИФС д. 32	фторопласт Ду-32	3	90	200
ИФС д. 50	фторопласт Ду-60	4	90	200
ИФС д. 25	фторопласт Ду-30	4,5	105	16,7
ИФС д. 32	паронит Ду-42	2	470	1
ИФС д. 50	паронит Ду-50	2,3	1050	0,24

При определении параметров изоляции газоиспользующих устройств между газопроводом и электрической частью этих устройств будем считать, что в нормальных условиях между газопроводом и электропроводкой потребителя находится воздух, а электропроводка проложена параллельно газопроводу, идущему от ИФС до потребителя, на расстоянии 0,1 м от трубопровода.

Значение  $E_{г.у}$  примем равным фазному напряжению электрической сети потребителя, т. е. 220 В.

Согласно ПУЭ металлические трубы газоснабжения должны быть присоединены к системе уравнивания потенциалов. Причем, если трубопровод газоснабжения имеет изолирующую вставку на вводе в здание, к основной системе уравнивания потенциалов присоединяется только та часть трубопровода, которая находится относительно изолирующей вставки со стороны здания. В схеме замещения данное требование учтено путем введения активного сопротивления  $R_3$ . В соответствии с [8] примем значение сопротивления заземления  $R_3$  равным 10 Ом.

Значения инвариантных параметров схемы замещения, использованные для имитационного моделирования, приведены в табл. 4.

Таблица 4

## Значения параметров схемы замещения

Параметр	$E_{СКЗ}, В$	$R_{СКЗ}, Ом$	$L_{СКЗ}, мГн$	$R_{Г,В}, Ом$	$L_{Г,В}, мГн$
Значение	220	0,5	0,3	$3,5 \cdot 10^{-3}$	3,7
Параметр	$R_{В,Г}$	$L_{В,Г}, мГн$	$C_{ИЗ}, пФ$	$E_{Г,У}, В$	$R_3, Ом$
Значение	$3,5 \cdot 10^{-3}$	3,7	4	220	10

## Результаты расчета

В результате проведенных расчетов и анализа полученных данных выяснили следующее.

Значение напряжения на ИФС при аварийных режимах работы системы катодной защиты определяется расстоянием от ближайшей станции катодной защиты до ответвления от газопровода в рассматриваемый жилой дом. Чем меньше расстояние, тем выше значение напряжения на ИФС (табл. 5).

Таблица 5

**Расчет напряжения на ИФС для различных значений расстояния от ближайшей станции катодной защиты до ответвления от газопровода в рассматриваемый жилой дом**

Расстояние $l_1, м$	1000	3000	5000	10000
Значение напряжения $U_{ИФС}, В$	331,9	47,96	25,1	11,1

*Примечание.* Расчет проведен для общей протяженности распределительного газопровода равной 40 км.

Значение напряжения на ИФС при аварийных режимах работы системы катодной защиты зависит от принятых потребителем мер защиты от поражения электрическим током при косвенном прикосновении. В случае присоединения трубопровода газоснабжения к системе уравнивания потенциалов значение напряжения на ИФС будет увеличиваться (табл. 6).

Значение напряжения на ИФС при аварийных режимах работы системы катодной защиты зависит от топологии газораспределительной системы. При определенном соотношении параметров схемы замещения газораспределительной системы может возникнуть резонанс напряжения. В этом случае напряжение на ИФС может достигнуть критического значения (десятков киловольт), при котором вероятен пробой изоляции (табл. 6).

Таблица 6

## Результаты расчетов при наличии резонансных явлений

Тип ИФС	Изоляция	Действующее значение напряжения на ИФС, кВ	
		При присоединении газопровода потребителя к системе выравнивания потенциалов	При отсутствии соединения газопровода с системой выравнивания потенциалов
ИФС д. 25	паронит Ду-32	68	0,12
ИФС д. 32	фторопласт Ду-32	71,1	2,71
ИФС д. 50	фторопласт Ду-60	71,1	2,71
ИФС д. 25	фторопласт Ду-30	70,9	1,16
ИФС д. 32	паронит Ду-42	67,3	0,09
ИФС д. 50	паронит Ду-50	57,2	0,02

*Примечание.* Расчеты проведены для  $l_1 = 1000$  м и общей протяженности распределительного газопровода равной 24050 м.

Резонанс возможен при выполнении следующего условия:

$$l_1 = \frac{1}{\omega^2 L_{уд} C_{уд} L_{общ}},$$

где  $\omega$  – угловая частота сети;  $L_{уд}$ ,  $C_{уд}$  – удельные значения индуктивности и емкости распределительного газопровода;  $L_{общ}$  – общая протяженность распределительного газопровода.

### Заключение

Следует отметить, что в работе определены необходимые, но не достаточные условия для воспламенения газа в области его утечки из ИФС. Были определены только условия пробоя изоляции ИФС, который сопровождается образованием искры, что в свою очередь может привести к воспламенению газовой смеси лишь при превышении минимальной мощности воспламенения искры и достаточной концентрации газа в области воспламенения. Проведенные расчеты являются приближенными, так как при моделировании и расчетах параметров схемы замещения был принят ряд упрощений и допущений, например, в схеме замещения не учитывалась среда, в которой находится газопровод (сопротивлением грунта и воздуха пренебрегали), пренебрегали активным сопротивлением изоляции газоиспользующих устройств между газопроводом и электрической частью этих устройств (считали, что оно бесконечно велико), не учитывали емкость газопровода-ввода и вводного газопровода и т. п.

Для уменьшения вероятности пробоя ИФС можно предложить следующие мероприятия:

1) при проектировании газораспределительных систем следует проводить дополнительные расчеты по определению резонанса напряжений на ИФС потребителей и принимать меры для исключения данных явлений;

2) в качестве вводного газопровода следует использовать пластиковые трубопроводы, не присоединяя их и газовые устройства к системе выравнивания потенциалов;

3) при эксплуатации газораспределительных систем следует принимать меры для исключения аварийного режима работы СКЗ, сопровождающегося переходом первичного напряжения понижающего трансформатора СКЗ на вторичную сторону с одновременным перекрытием выпрямительных элементов выпрямительной установки, например, применять быстродействующие защиты от повышения тока и повышения напряжения со стороны СКЗ;

4) величина значения напряжения на ИФС зависит от типа изоляции фланцевого соединения;

5) наибольшее значение напряжения при моделировании наблюдались для ИФС типа ИФС д. 32 с изолирующей прокладкой из фторопласта Ду-32, а также ИФС д. 50 с изолирующей прокладкой из фторопласта Ду-60 (табл. 6).

### Литература

1. ТКП 45-4.03-267–2012 (02250) Газораспределение и газопотребление. Строительные нормы проектирования. – Минск : Минстройархитектуры, 2012. – 97 с.
2. Надежность и безопасность магистрального трубопроводного транспорта : материалы VII Междунар. науч.-техн. конф., Новополоцк, 22–25 нояб. 2011 г. / Полоц. гос. ун-т ; под общ. ред. д-ра техн. наук, проф. В. К. Липского. – Новополоцк, 2011. – 292 с.
3. Цих, В. С. Проблеми безконтактного виявлення та ідентифікації дефектів підземних нафтогазопроводів з поверхні землі / В. С. Цих, А. В. Яворський, С. П. Ващишак // Науковий вісник ІФНТУНГ. – 2011. – № 3 (29). – С. 104–111.

4. Правила промышленной безопасности в области газоснабжения Республики Беларусь. – Минск : Энергопресс, 2014. – 262 с.
5. Богородицкий, Н. П. Электротехнические материалы : учеб. для вузов / Н. П. Богородицкий, В. В. Пасынков, Б. М. Тареев. – Л. : Энергоатомиздат, 1985. – 304 с.
6. Калантаров, П. Л. Расчет индуктивностей / П. Л. Калантаров, Л. А. Цейтлин. – Л. : Энергоатомиздат, 1986. – 488 с.
7. Яворский, Б. М. Справочник по физике для инженеров и студентов вузов / Б. М. Яворский, А. А. Детлаф, А. К. Лебедев. – М. : Оникс, 2008. – 1056 с.
8. ТКП 339–2011 Электроустановки на напряжение до 750 кВ. – Минск : Филиал «Информ.-издат. центр» ОАО «Экономэнерго», 2011. – 593 с.

*Получено 09.12.2016 г.*