

УДК 620.169.2

ВОЗДЕЙСТВИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОТЕНЦИАЛОВ ОБОРУДОВАНИЯ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ ПРИРОДНОГО ГАЗА НА ИЗОЛЯЦИЮ ФЛАНЦЕВЫХ СОЕДИНЕНИЙ ГАЗОПРОВОДОВ

Зализный Д.И., Рудченко Ю.А., Новиков М.Н., Мороз Д.Р.

Разработана электрическая схема замещения газопровода, позволяющая рассчитывать разность потенциалов на изоляции фланцевого соединения, установленного между ответвлением от радиального распределительного подземного газопровода низкого давления и газопроводом, соединенным с газовыми приборами потребителя. В схеме учтены активное, индуктивное и емкостное сопротивления газопровода. На основе имитационного моделирования показано, что наибольшие перенапряжения на фланцевом соединении, способные привести к пробое изоляции и последующему воспламенению газа, обусловлены работой электрического розжига газовых приборов при нарушении потребителем правил эксплуатации электроустановок.

Ключевые слова: газопровод, фланцевое соединение, изоляция, перенапряжение, электрический пробой.

(Поступила в редакцию 21 ноября 2016 г.)

Введение. За последние 5 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 изолирующих фланцевых соединениях (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 достаточной мощности.

В распределительных газопроводах низкого давления наличие ИФС необходимо для электрического разделения подземной части газопровода и надземной части, идущей непосредственно к потребителю. Это связано с тем, что подземные трубопроводы находятся под потенциалом защиты от электрохимической коррозии. В соответствии с ГОСТ [1, с. 46] значение этого потенциала не должно превышать $-2,5$ В относительно медно-сульфатного электрода, погруженного в землю.

Изоляцию ИФС выполняют из паронита или фторопласта. В результате испытаний, проведенных на ОАО «Минский электротехнический завод имени В.И. Козлова» (протокол испытаний № 15/2016 от 12.09.2016), для паронита толщиной 4 мм минимальное амплитудное значение напряжения пробоя составляет 4,1 кВ, а для фторопласта толщиной 4 мм это значение равно 7,4 кВ.

В данной статье представлены результаты расчетов разности потенциалов на изоляции ИФС для различных от условий работы газового оборудования потребителей. Цель работы – выявление ситуаций, при которых возможен электрический пробой изоляции ИФС.

Электрическая схема замещения газопровода. В научной литературе имеются достаточно сложные электрические схемы замещения для подземных трубопроводов. Так в [2] представлена схема из большого количества сопротивлений, учитывающих различные участки грунта и воздуха, а также элементы коммуникаций. В [3] нефтегазопроводы рассматриваются как длинные линии с распределенными параметрами. В [4] изучается распределение электрического поля вокруг трубопровода. Во всех этих случаях требуются подробные сведения о геометрии подземных и надземных сооружений.

Разработаем упрощенную электрическую схему замещения фрагмента сети газоснабжения. В рамках поставленной задачи нет смысла изучать крупные участки этой сети, так как определяющее влияние на работу изоляции ИФС будут оказывать близлежащие участки газопровода.

Рассмотрим фрагмент сети газоснабжения по отношению к некоторому жилому дому, имеющему газовый отопительный котел, нагреватель, газовую плиту и другие газовые устройства (рис. 1). При этом ответвление от распределительного газопровода низкого давления должно быть металлическим и соединено вторым концом с ИФС.

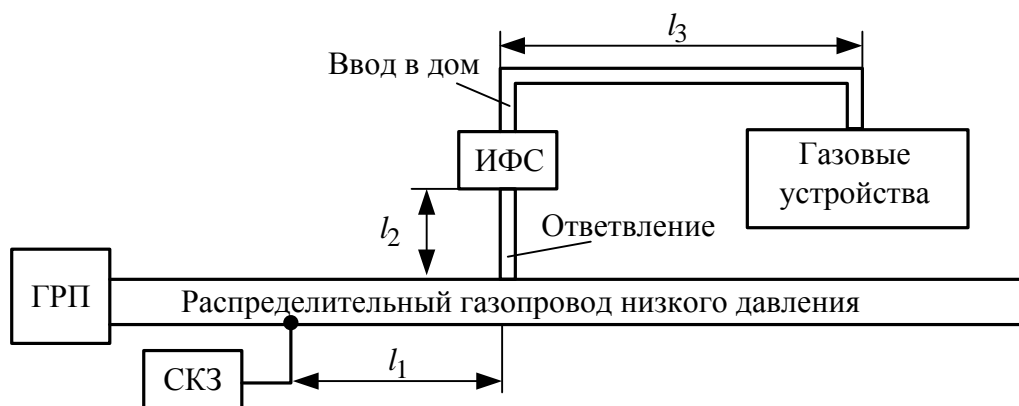


Рисунок 1 – Схема газоснабжения жилого дома:
ИФС – изолирующее фланцевое соединение; **СКЗ** – станция катодной защиты;
ГРП – газораспределительный пункт

Пусть l_1 – расстояние от ближайшей станции катодной защиты (СКЗ) до ответвления от распределительного газопровода в рассматриваемый жилой дом; l_2 – длина металлического ответвления до ИФС; l_3 – длина газопровода от ИФС до потребляющих газовых устройств.

Составим электрическую схему замещения системы газоснабжения жилого дома в соответствии с рис. 1. Предлагаемая схема показана на рис. 2.

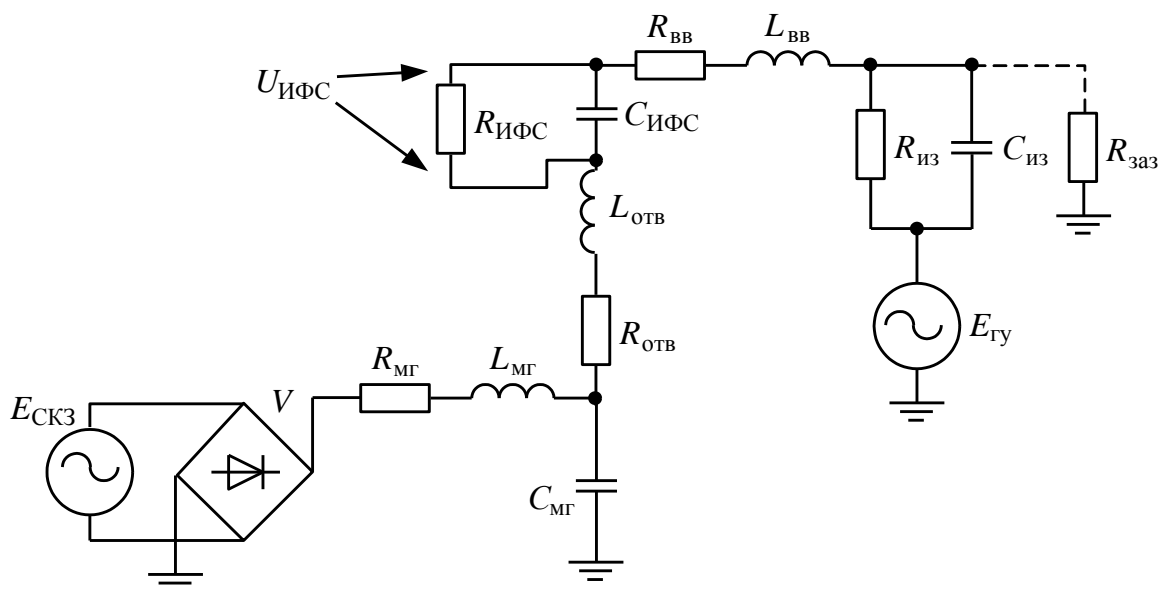


Рисунок 2 – Электрическая схема замещения системы газоснабжения жилого дома

Рассмотрим назначение элементов в схеме на рис. 2.

$E_{СКЗ}$ – электродвижущая сила (ЭДС), формируемая СКЗ. В большинстве схем СКЗ для получения постоянной составляющей напряжения используют выпрямительное устройство V .

$R_{МГ}$, $L_{МГ}$ – активное сопротивление и индуктивность распределительного газопровода от точки подключения СКЗ до рассматриваемого ответвления.

$R_{отв}$, $L_{отв}$ – активное сопротивление и индуктивность металлического ответвления от распределительного газопровода до точки соединения с ИФС.

$C_{МГ}$ – электрическая емкость электрически соединенных распределительных газопроводов по отношению к земле. Емкость $C_{МГ}$ обусловлена наличием изоляции, покрывающей подземные металлические газопроводы.

$R_{ИФС}$, $C_{ИФС}$ – активное сопротивление и индуктивность ИФС.

$R_{\text{вв}}, L_{\text{вв}}$ – активное сопротивление и индуктивность газопровода от ИФС до потребляющих газовых устройств.

$R_{\text{из}}, C_{\text{из}}$ – активное сопротивление и индуктивность электрической изоляции газовых устройств между газопроводом и электрической частью этих устройств.

$E_{\text{гу}}$ – ЭДС, прикладываемая к изоляции газовых устройств по отношению к земле.

$R_{\text{заз}}$ – сопротивление заземления.

Расчет параметров электрической схемы замещения. Значение $R_{\text{мг}}$ будем рассчитывать по известной формуле:

$$R_{\text{мг}} = \rho_{\text{уд}} \cdot \frac{l_1}{S} = \rho_{\text{уд}} \cdot \frac{l_1}{\pi \cdot (r^2 - q^2)}, \text{ Ом}, \quad (1)$$

где $\rho_{\text{уд}}$ – удельное сопротивление материала трубы; l_1 – длина участка распределительного газопровода; S – площадь сечения трубы; r – внешний радиус трубы; q – внутренний радиус трубы.

Параметр $L_{\text{мг}}$ определим как индуктивность полого прямолинейного проводника [5, с. 96]:

$$L_{\text{мг}} = \frac{\mu \cdot \mu_0 \cdot l_1}{2 \cdot \pi} \cdot \left(\ln \frac{2 \cdot l_1}{r \cdot c} - 1 \right), \text{ Гн}, \quad (2)$$

где μ – относительная магнитная проницаемость материала трубы; μ_0 – магнитная постоянная; c – параметр, выбираемый из таблицы [5, с.380].

По аналогичным формулам можно рассчитать величины $R_{\text{отв}}, L_{\text{отв}}, R_{\text{вв}}, L_{\text{вв}}$, взяв соответствующие расстояния l_2 и l_3 .

Все электрически соединенные газопроводы формируют единую электрическую емкость относительно земли. Поэтому общую емкость $C_{\text{мг}}$ определим как сумму емкостей отдельных газопроводов по формуле цилиндрического конденсатора [6, с. 377]:

$$C_{\text{мг}} = \sum_{i=1}^n \frac{2 \cdot \pi \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot l_{\text{мг},i}}{\ln \frac{r_i + 2 \cdot t_i}{r_i}}, \text{ Ф}, \quad (3)$$

где ε – относительная диэлектрическая проницаемость материала изоляции подземного газопровода; ε_0 – электрическая постоянная; $l_{\text{мг},i}$ – длина i -го магистрального газопровода; r_i – внешний радиус трубы i -го распределительного газопровода; t_i – толщина изоляции i -го распределительного газопровода.

Значения $R_{\text{ИФС}}$ и $C_{\text{ИФС}}$ для имеющихся образцов ИФС были найдены опытным путем с помощью электронного измерителя иммитанса Е7-14. Результаты измерений приведены в табл. 1.

Таблица 1 – Результаты измерений электрических параметров ИФС

Тип ИФС	Изоляция	Толщина, мм	$C_{\text{ИФС}}$, пФ	$R_{\text{ИФС}}$, МОм
ИФСд.25	паронит ДУ32	2	1100	1,6
ИФСд.32	фторопласт ДУ32	3	90	200
ИФСд.50	фторопласт ДУ60	4	90	200
ИФСд.25	фторопласт ДУ30	4,5	105	16,7
ИФСд.32	паронит ДУ42	2	470	1
ИФСд.50	паронит ДУ50	2,3	1050	0,24

Значения параметров $R_{\text{из}}, C_{\text{из}}$ и $E_{\text{гу}}$ примем в зависимости от вида имитационного моделирования. При этом параметр $C_{\text{из}}$ можно рассчитать по известным значениям сопротивления изоляции $R_{\text{из}}$ и тангенса угла диэлектрических потерь $\text{tg} \delta$ этой изоляции:

$$C_{\text{из}} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot R_{\text{из}} \cdot \text{tg} \delta}, \text{ Ф}, \quad (4)$$

где f – частота напряжения.

Имитационное моделирование разности потенциалов на ИФС в нормальном режиме. Под нормальным режимом будем подразумевать условия работы ИФС при исправном заземленном газовом оборудовании потребителей, имеющем электрическое разделение с газопроводом.

Для имитационного моделирования примем значения, приведенные в табл. 2.

Таблица 2 – Исходные данные для имитационного моделирования

Параметр	Обозначение	Значение	Размерность
Общая длина распределительного газопровода	l	10000	м
Длина распределительного газопровода от СКЗ до ответвления	l_1	3000	м
Длина ответвления от распределительного газопровода до ИФС	l_2	10	м
Длина газопровода от ИФС до потребляющих газовых устройств	l_3	10	м
Внешний радиус распределительного газопровода	r_1	0,0825	м
Внутренний радиус распределительного газопровода	q_1	0,075	м
Толщина изоляции распределительного газопровода	t	0,01	м
Внешний радиус ответвления от распределительного газопровода	r_2	0,0168	м
Внутренний радиус ответвления от распределительного газопровода	q_2	0,0125	м

Результаты расчетов в соответствии с формулами (1)–(3): $R_{мг} = 0,11 \text{ Ом}$; $L_{мг} = 1,84 \text{ Гн}$; $C_{мг} = 30,7 \text{ мкФ}$; $R_{отв} = 3,5 \text{ мОм}$; $L_{отв} = 3,7 \text{ мГн}$; $R_{вв} = 3,5 \text{ мОм}$; $L_{вв} = 3,7 \text{ мГн}$.

При расчете параметров изоляции $R_{из}$ и $C_{из}$ будем исходить из того, что в нормальных условиях между газопроводом и электропроводкой потребителя находится воздух. Удельное объемное сопротивление воздуха ρ_v составляет около $10^{16} \text{ Ом} \cdot \text{м}$ [7, с. 50]. Пусть электропроводка проложена параллельно газопроводу, идущему от ИФС до потребителя, на расстоянии $l_e = 0,1 \text{ м}$. Примем наружный диаметр провода равным $0,005 \text{ м}$. Тогда площадь сечения для сопротивления изоляции будет равна: $S_e = 0,005 \cdot l_3 = 0,005 \cdot 10 = 0,05 \text{ м}^2$. Используя эти значения, рассчитаем сопротивление изоляции:

$$R_{из} = \rho_v \cdot \frac{l_e}{S_e} = 10^{16} \cdot \frac{0,1}{0,05} = 2 \cdot 10^{16} \text{ Ом}.$$

Зная, что для воздуха $tg \delta \approx 4 \cdot 10^{-8}$ [7, с. 50], по формуле (4) найдем емкость изоляции на стороне потребителя:

$$C_{из} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 2 \cdot 10^{16} \cdot 4 \cdot 10^{-8}} = 4 \text{ пФ}.$$

В соответствии с ГОСТ [1, с. 46] примем $E_{СКЗ} = 2,5 \text{ В}$.

ЭДС $E_{гв}$ – это значение фазного напряжения электрической сети потребителя, то есть $E_{гв} = 220 \text{ В}$.

Результаты расчетов пикового положительного значения напряжения $U_{ИФС}$ (рис. 2) сведены в табл. 3, из которой следует, что в нормальном режиме наибольшие значения напряжения на ИФС наблюдаются при использовании изоляции из фторопласта. Однако эти напряжения не представляют опасности для людей и не могут привести к пробое изоляции ИФС.

Имитационное моделирование разности потенциалов на ИФС в аномальных режимах. Рассмотрим следующие факторы, не являющиеся нормальными для работы газопровода на стороне потребителей:

- касание изолированной электропроводки к газопроводу;
- касание электропроводки с нарушенной изоляцией к газопроводу;
- влияние потенциала электророзжига при наличии контакта между корпусом прибора с электророзжигом и газопроводом.

При наличии контакта между изолированной электропроводкой и газопроводом на стороне потребителя значение сопротивления $R_{из}$ будет равно сопротивлению изоляции

электропроводки. Для имитации такой ситуации в лабораторных условиях был поставлен эксперимент, при котором к покрашенной водопроводной трубе диаметром 27 мм на длине 20 см был прикреплен с помощью изолянты шнур электропитания с сечением провода 1,5 мм². К жиле шнура был подсоединен первый измерительный щуп прибора Е7-14, а к зачищенному участку трубы – второй измерительный щуп прибора Е7-14. Результаты измерения: $R_{из} = 10$ МОм; $C_{из} = 200$ пФ. Для электропроводки с нарушенной изоляцией приемом сопротивление изоляции $R_{из} = 100$ Ом.

Результаты расчетов для рассматриваемых типов ИФС даны в табл. 3.

Таблица 3 – Результаты расчета разности потенциалов на ИФС

Тип ИФС	Изоляция	$U_{ифс}$, В (максимальные пиковые значения)		
		нормальный режим	касание исправной проводки	касание неисправной проводки
ИФСд.25	паронит ДУ32	0,6	43,8	308,7
ИФСд.32	фторопласт ДУ32	12,7	259,7	308
ИФСд.50	фторопласт ДУ60	12,7	259,7	308
ИФСд.25	фторопласт ДУ30	5,6	195,6	307,3
ИФСд.32	паронит ДУ42	0,4	32,7	308,5
ИФСд.50	паронит ДУ50	0,09	8,5	308,5

Как следует из табл. 3, при соприкосновении газопровода даже с исправной электропроводкой, на ИФС возможно наличие разности потенциалов. Однако во всех рассмотренных ситуациях значение $U_{ИФС}$ не превышает напряжения пробоя изоляции.

Наиболее вероятной причиной появления перенапряжений на ИФС является влияние потенциала электророзжига, имеющегося в газовой плите, отопительном котле или нагревателе.

Большинство схем электророзжига выполняют на основе функциональной схемы, приведенной на рис. 3.

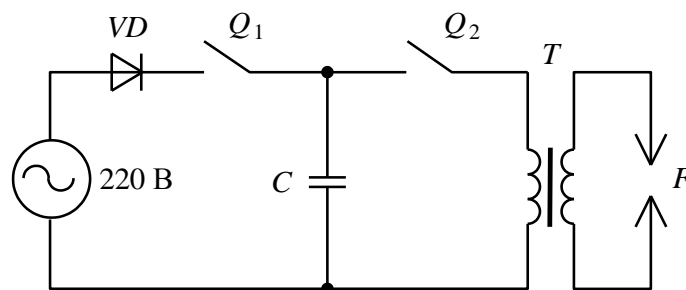


Рисунок 3 – Функциональная схема электророзжига

Схема работает следующим образом. Вначале замыкается ключ Q_1 , и конденсатор C заряжается от напряжения сети через диод VD . Затем ключ Q_1 размыкается, а замыкается ключ Q_2 . При этом конденсатор разряжается на первичную обмотку повышающего трансформатора T . На вторичной обмотке трансформатора T возникает импульс напряжения со значением от 5 до 20 кВ, и происходит разряд в разряднике F .

Один из контактов разрядника соединяется, как правило, с корпусом прибора. При нарушениях эксплуатации этот корпус может быть не заземлен. Между корпусом прибора и газопроводом имеется некоторая изоляция с параметрами $R_{из}$ и $C_{из}$. Исследуем влияние импульса напряжения от электророзжига в такой ситуации.

Воспользуемся программой *Electronics Workbench*. Имитационная схема электророзжига, составленная в соответствии с рис. 3, а также осциллограмма получаемого импульса приведены на рис. 4.

Пиковое значение импульса составило 12,6 кВ.

Результаты расчета, выполненные в программе *Electronics Workbench*, для различных ситуаций, приведены в табл. 4.

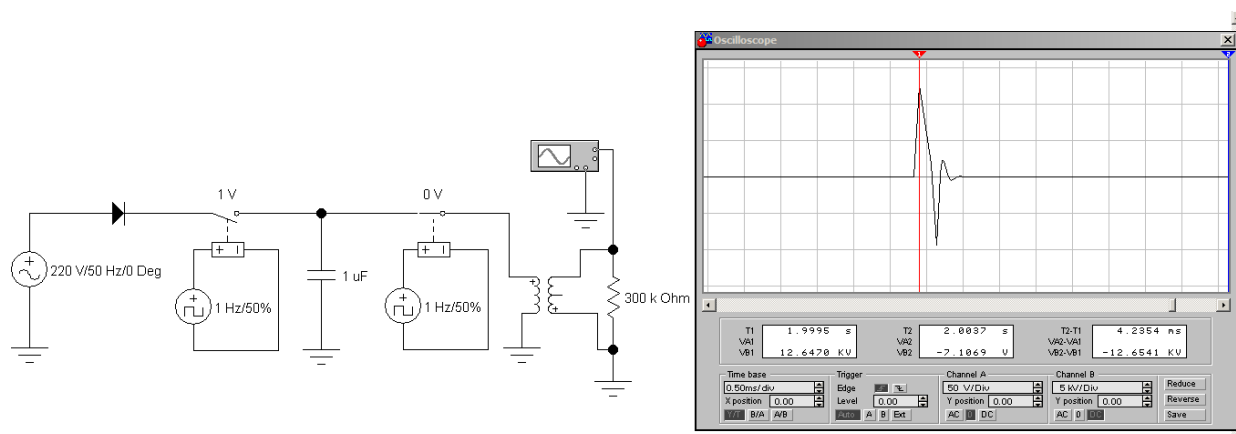


Рисунок 4 – Имитационная схема электророзжига в программе *Electronics Workbench*

Таблица 4 – Результаты расчета разности потенциалов на ИФС при включении электророзжига

Тип ИФС	Изоляция	$U_{\text{ИФС}}$, В (максимальные пиковые значения)		
		нормальный режим	касание исправной проводки	касание неисправной проводки
ИФСд.25	паронит ДУ32	34,3	2000	3000
ИФСд.32	фторопласт ДУ32	410	6400	7900
ИФСд.50	фторопласт ДУ60	410	6400	7900
ИФСд.25	фторопласт ДУ30	342,3	4100	8100
ИФСд.32	паронит ДУ42	92,3	2050	4700
ИФСд.50	паронит ДУ50	37,1	775	1500

Как видно из табл. 4, при соприкосновении газопровода с исправной электропроводкой в момент включения электророзжига на ИФС возможны достаточно высокие пиковые значения напряжения импульсного характера, не превышающие, однако напряжения пробоя. Если же изоляция кабеля, соприкасающегося с газовой трубой, повреждена, то вероятность пробоя изоляции ИФС достаточно велика.

В качестве способа борьбы с перенапряжениями на ИФС можно предложить заземление газопровода на стороне потребителя. При добавлении в схему на рис. 2 сопротивления заземления $R_{\text{заз}} = 10 \text{ Ом}$ [8, п.4.3.2.13] при любых ситуациях пиковое значение напряжения $U_{\text{ИФС}}$ не превышает нескольких десятков вольт.

Выводы. В процессе монтажа газопровода на стороне потребителя ни на одном из участков газовой трубы не должно быть соприкосновения с электропроводкой или с корпусом газового прибора. При этом газопровод и все корпуса газовых приборов необходимо подключить к контуру заземления или заземленному проводнику *PE* системы электропитания. При невыполнении этих требований на ИФС возможны перенапряжения, способные привести к пробоям изоляции, нарушению герметизации газопровода и последующему воспламенению.

ЛИТЕРАТУРА

- ГОСТ 9.602-2005. Единая система защиты от коррозии и старения. Сооружения подземные. Общие требования к защите от коррозии. – М.: Стандартинформ, 2006. – 135 с.
- Micu, D.D. Evaluation of induced AC voltages in underground metallic pipeline / D.D. Micu and others // COMPEL. – 2012. – Vol 31. – Iss: 4. – Pp. 1133-1143.
- Цих, В.С. Аналитическое моделирование для определения возможностей обнаружения отслоений изоляционного покрытия подземных нефтегазопроводов с помощью фазового метода контроля / В.С. Цих // Нефтегазовое дело. – 2012. – №5. – с. 496–506.
- Гарифуллина, С.Р. Математическое моделирование и численное исследование электрических полей протяженных электродов в полуограниченном пространстве / С.Р. Гарифуллина / Автореферат диссертации на соиск. уч. ст. канд. техн. наук. – Башкирский государственный университет. – 2011. – 17 с.

5. Калантаров, П.Л. Расчет индуктивностей / П.Л. Калантаров, Л.А. Цейтлин. – Ленинград: Энергоатомиздат, 1986. – 488 с.
6. Яворский, Б.М. Справочник по физике для инженеров и студентов вузов / Б.М. Яворский, А.А. Детлаф, А.К. Лебедев. – М.: ООО «Издательство Оникс», 2008. – 1056 с.
7. Богородицкий, Н.П. Электротехнические материалы: Учебник для вузов. – Н.П. Богородицкий, В.В. Пасынков, Б.М. Тареев. – Л.: Энергоатомиздат, 1985. – 304 с.
8. ТКП 339-2011. Электроустановки на напряжение до 750 кВ. – Мн.: филиал «Информационно-издательский центр» ОАО «Экономэнергo», 2011. – 593 с.

INFLUENCE OF ELECTRIC POTENTIALS FROM NATURAL GAS CONSUMERS' EQUIPMENT TO THE INSULATION OF GAS-MAINS FLANGE CONNECTIONS

Dzmitry Zalizny, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor
Sukhoi State Technical University of Gomel, Gomel, Belarus

Jury Rudchenko, Candidate of Technical Sciences
Sukhoi State Technical University of Gomel, Gomel, Belarus

Mikhail Novikov, Candidate of Technical Sciences
Sukhoi State Technical University of Gomel, Gomel, Belarus

Denis Moroz, Candidate of Technical Sciences
Project Scientific Research Republican Enterprise «NII BELGIPROTOPGAZ», Minsk, Belarus

Purpose. This investigation is aimed to realize how the electric breakdown of gas-main flange connections can occur.

Methods. Imitation modeling method is described in this paper.

Findings. An equivalent electrical scheme of gas-mains is developed in the paper. The electrical scheme consists of the active, inductive and capacitive resistances. Using the imitation modeling it is shown that highest voltage on the gas-mains flange connections can occur when electrical kindling is switched on and operation rules of electrical installations are broken. The overvoltage can bring to the flange connection insulation breakdown and to provoke the gas ignition.

Application field of research. The obtained results can be used in the design of gas-main pipelines protection.

Conclusions. The gas pipes and gas equipment on the consumer side are to be grounded and should not touch the electrical cables to avoid the electrical breakdown of the flange connection insulation.

Keywords: gas-main, flange connection, insulation, overvoltage, electrical breakdown.

(The date of submitting: November 14, 2016)

REFERENCES

1. *GOST 9.602-2005.* Edinaya sistema zastchityi ot korrozii i stareniya. Sooruzheniya podzemnie. Obstie trebovanya k zastchite ot korrozii [Unified system of corrosion and ageing protection. Underground constructions]. Moscow.: Standartinform, 2006. 135 p. (rus)
2. Micu D.D. and others. Evaluation of induced AC voltages in underground metallic pipeline *COMPEL*. 2012. Vol 31. Iss: 4. Pp. 1133-1143. (rus)
3. Tsih V.S. Analiticheskoe modelirovanie dlya opredeleniya vozmognoy obnaruzheniya otsloeniy isolatsionnogo pokrytiya podzemnih neftegazoprovodov s pomostchuy fazovogo metoda kontrolya [Analytical modeling with the phase control method to detect the exfoliation of the gas-main isolation] *Neftegazovoe delo* [Petroleum and gas business]. 2012. No. 5. Pp. 496-506. (rus)
4. Garifullina S.R. Matematicheskoe modelirovanie i tchislennoe issledovanie elektricheskikh poley protyagennykh elektrodov v poluogranichennom prostranstve [The electrical field with long electrodes in the semi-bounded mathematical modeling and numerical investigation] *Dissertation abstract* Bashkir University. 2011. 17 p. (rus)
5. Kalantarov P.L., Tseitlin L.A. *Rastchet induktivnostey* [Inductance calculating] Leningrad.: Energoatizdat, 1986. 488 p. (rus)
6. Yavorsky B.M., Detlaf A.A., Lebedev A.K. *Spravochnik po fizike dlya ingenerov i studentov vuzov* [Physics reference book for engineers and students] Moscow: OOO «Izdatelstvo onix», 2008. 1056 p.
7. Bogoroditsky N.P., Pasinkov V.V., Tareev B.M. *Electrotekhnicheskie materialy* [Electrotechnical materials] Leningrad.: Energoatizdat, 1985. 304 p. (rus)
8. ТКР 339-2011. Electroustanovki na napriagienie do 750 kV. [750 kV power equipments] Minsk: phillial «Informatsionno-izdatelskiy tsentr» OAO «Economenergo», 2011. 593 p. (rus)