

УДК 621.643.412:006.354

**ФЛАНЦЫ ЭЛЕКТРОИЗОЛИРУЮЩИЕ  
ДЛЯ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ ЗАЩИТЫ ТРУБОПРОВОДОВ****И.И. ГЕРАСИМЧИК, Л.З. ХАНЕЦКИЙ, И.А. ШКУРСКИЙ***(ОАО «Белтрансгаз», Минск),**канд. техн. наук, доц. В.Л. БАСИНЮК, канд. техн. наук Е.И. МАРДОСЕВИЧ**(Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, Минск),**д-р техн. наук, проф. В.А. СТРУК, канд. техн. наук Е.В. ОБЧИННИКОВ**(Гродненский государственный аграрный университет)*

*Приведены результаты исследований в области создания электроизолирующих фланцевых соединений магистральных трубопроводов с покрытиями на основе термopластичной полимерной композиции «Терамид», обеспечивающей повышенные электроизолирующие и прочностные свойства разделительных герметизирующих элементов, работающих под давлением в атмосферных условиях.*

**Введение.** Электрохимическая защита (ЭХЗ) магистральных (МГ) трубопроводов позволяет не только существенно повысить их ресурс, но и значительно снизить эксплуатационные затраты на восстановление разрушенных коррозией участков и повысить безопасность эксплуатации.

К одному из важных и технологически сложных в изготовлении можно отнести электроизолирующие фланцы, диэлектрически разделяющие (при необходимости) отдельные участки трубопроводов на автономные участки. Поэтому в области совершенствования их конструкционного исполнения постоянно проводятся интенсивные исследования [1 – 5].

К электроизолирующим элементам фланцев предъявляются повышенные требования по механическим и электрическим прочностным свойствам, которые должны быть не ниже соответственно 260 МПа и 1200 В [6, 7]. Возможности реализации этих требований с традиционно используемыми для этих целей текстолитом или фторопластом крайне затруднены. Поэтому до настоящего времени на территории Республики Беларусь отсутствовала нормативная документация, конструкционные и технологические решения, позволяющие изготавливать фланцы электроизолирующие с требуемым комплексом свойств и практически весь потребляемый объем этого вида продукции импортировался из России и Украины.

В 2004 – 2005 годах специалистами ОАО «Белтрансгаз», «Института механики и надежности машин Национальной академии наук Беларуси» и Гродненского государственного университета совместно был проведен комплекс научно-исследовательских, опытно-конструкторских и технологических работ по созданию отечественных изолирующих фланцев (ТУ РБ 190410065.001-2004), не уступающих, а по электрической прочности и превосходящих, Российские и Украинские аналоги.

**Цель исследований** заключалась в разработке конструктивного исполнения покрытия, обеспечивающего при прочности на сжатие более 260 МПа повышенную до 3 кВ электрическую прочность фланцевого соединения.

**Методика проведения исследований.** На основе анализа особенностей конструкционного исполнения фланцевых соединений в качестве базовых были приняты технические решения в соответствии с исполнениями 2 – 5, 8, 9 ГОСТ 12815, имеющими кольцевой выступ и ответную впадину на сопрягаемых поверхностях, что обеспечивает работу электроизолирующих элементов только на сжатие. Климатическое исполнение фланцевого соединения соответствует УХЛ-4 по ГОСТ 15150, условия эксплуатации ориентированны на условное давление  $P_y$  до 10,0 МПа, температуру окружающей среды от 223 К (минус 50 °С) до 353 К (плюс 80 °С) и влажность, достигающую 100 %. Исследования проводились на примере соединения фланцев с ДУ 50. Оценивалось влияние схемы расположения и толщины покрытия на электрическую прочность электроизолирующего фланцевого соединения, определяющие требования к их конструктивному исполнению, технологии формирования, средствам испытаний и контроля служебных свойств. Покрытие на фланцах выполнялось методом вихревого напыления в псевдоожоженном слое порошка из разработанной полимерной композиции – термopластичного «Терамида» на основе полиамида-6 [8].

Предварительно на образцах при сжатии покрытия давлением 260 МПа определялась его электрическая прочность. Испытания проводились на 12 образцах. При испытаниях постоянное и переменное (с промышленной частотой) напряжение плавно увеличивалось до электрического пробоя. Полученные результаты обрабатывались с использованием методики [9], в рамках реализации которой:

- рассчитывалось с учетом исходного значения толщины покрытия условное (при исследованиях покрытие находилось в деформированном состоянии) значение электрической прочности и строился вариационный ряд полученных значений;

- для постоянного и переменного напряжения определялось среднее значение электрической прочности  $\bar{E}_{np}$  (кВ/мм), среднее квадратическое отклонение  $S$  (кВ/мм) и коэффициент вариации  $v$  (%):

$$\bar{E}_{np} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{U_i}{t_i}, \quad (1)$$

$$S = \frac{\sum \bar{E}_{np} \cdot U_{pj}}{U_{pj}^2}, \quad (2)$$

$$v = 100S / \bar{E}_{np}, \quad (3)$$

где  $U_i$  – пробивное напряжение, кВ (в случае переменного напряжения, кВ<sub>эфф</sub>);  $t_i$  – средняя арифметическая толщина образца в месте расположения электрода, мм;  $n$  – количество измерений;

- строилась аппроксимирующая функция распределения электрической прочности:

$$E_{np} = \bar{E}_{np} + SU_{pj}; \quad (4)$$

- оценивалось соответствие распределения значений электрической прочности нормальному закону при доверительной вероятности  $\beta = 0,997$  по критерию нахождения их в интервале:

$$\bar{E}_{np} \pm 3S; \quad (5)$$

- определялись доверительные интервалы для математического ожидания  $a_E$  и дисперсии  $\sigma^2_E$ :

$$\bar{E}_{np} - \frac{S}{\sqrt{n}} t_{\beta k} \leq a_E \leq \bar{E}_{np} + \frac{S}{\sqrt{n}} t_{\beta k}, \quad (6)$$

$$S \psi_1 \sqrt{\frac{n-1}{n}} \leq \sigma_E \leq S \psi_2 \sqrt{\frac{n-1}{n}}, \quad (7)$$

где  $t_{\beta k}$  – критерий Стьюдента, для рассматриваемого случая равный [8]  $t_{\beta k} = 3,112$ ;  $\psi_1, \psi_2$  – коэффициенты, для рассматриваемого случая равные:  $\psi_1 = 0,641, \psi_2 = 2,056$  [8];

- рассчитывались координаты  $U_E$  и  $P_E$  функций распределения значений пробивного напряжения (табл. 1) и строились их графики;

- определялись минимально допустимые значения толщин электрической прочности, обеспечивающие электрическую прочность фланцевого соединения не менее 3 кВ.

Таблица 1

Номера точек	Значение ординаты		Значение абсциссы
	$P_{pk}$	$U_{pk}$	
1	0,841	1,00	$\bar{E}_{np} + S \left( \psi_1 \sqrt{(n-1)/n} - t_{\beta k} / \sqrt{n} \right)$
2	0,500	0,00	$\bar{E}_{np} - S t_{\beta k} / \sqrt{n}$
3	0,159	- 1,00	$\bar{E}_{np} - S \left( \psi_2 \sqrt{(n-1)/n} + t_{\beta k} / \sqrt{n} \right)$
4	0,841	1,00	$\bar{E}_{np} + S \left( \psi_2 \sqrt{(n-1)/n} + t_{\beta k} / \sqrt{n} \right)$
5	0,500	0,00	$\bar{E}_{np} + S t_{\beta k} / \sqrt{n}$
6	0,159	- 1,00	$\bar{E}_{np} - S \left( \psi_1 \sqrt{(n-1)/n} - t_{\beta k} / \sqrt{n} \right)$

При исследованиях электрической прочности фланцев в сборе (рис. 1) в качестве исходной схемы расположения полимерного материала использовалось регламентированное размещение электроизолирующих элементов на опорных поверхностях (рис. 1, а) и сформированное на всей поверхности фланцев «замкнутое» покрытие (рис. 1, б).

Толщины электроизолирующих элементов на фланцах составляли  $0,65 \pm 0,5$  мм. При исследованиях к фланцам подводилось плавно увеличивающееся до пробоя напряжение. Значения напряжений пробоя регистрировалось. Одновременно с испытаниями на электрическую прочность осуществлялась оценка прочности покрытия при его сжатии. На основе анализа полученных данных определялось рациональное конструктивное исполнение электроизолирующего покрытия, требования к технологии его формирования и испытаний в процессе изготовления электроизолирующего фланцевого соединения.

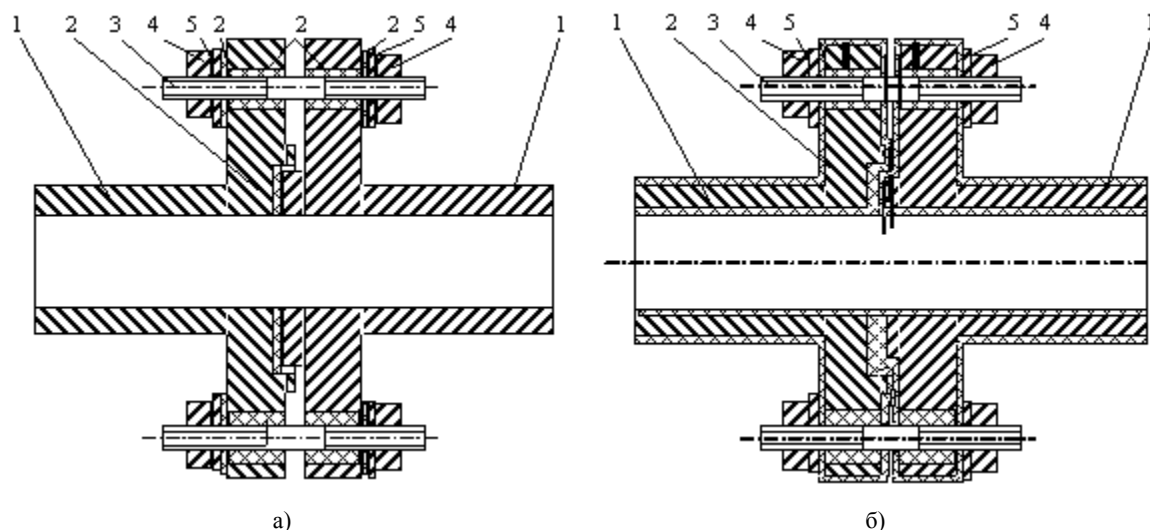


Рис. 1. Фланцевое соединение с используемой (а) и разработанной (б) схемой размещения электроизолирующих элементов:

1 – фланцы; 2 – электроизолирующие элементы; 3 – соединительные шпильки; 4 – гайки; 5 – шайбы

### Результаты исследований и их обсуждение

Результаты исследований электрической прочности на образцах приведены в таблице 2.

Таблица 2

$j$	$P_j$	$U_{pj}$	$U_{pj}^2$	Переменное U		Постоянное U	
				$E_{np}$	$U_{pj}E_{np}$	$E_{np}$	$U_{pj}E_{np}$
1	0,561	-1,59	2,52	13,6	-21,60	16,6	-26,36
2	0,137	-1,10	1,20	15,1	-16,53	17,3	-18,94
3	0,218	-0,78	0,61	16,9	-13,19	18,6	-14,52
4	0,298	-0,53	0,28	17,2	-9,11	20,8	-11,02
5	0,379	-0,31	0,10	17,5	-5,40	21,7	-6,69
6	0,460	-0,10	0,01	18,3	-1,86	22,1	-2,24
7	0,540	0,10	0,01	18,5	1,88	22,6	2,29
8	0,621	0,31	0,28	18,9	5,83	22,7	7,00
9	0,702	0,53	0,28	19,1	10,12	23,6	12,50
10	0,783	0,78	0,61	19,9	15,54	24,1	18,81
11	0,863	1,10	1,20	22,2	24,31	25,6	28,03
12	0,944	1,59	2,52	22,5	35,73	26,8	42,56
$\Sigma$			9,43	219,7	25,71	262,5	31,42
$\bar{E}_{np}$				18,31		21,88	
S				2,73		3,33	
v				14,9		15,2	

Аппроксимирующие функции распределения электрической прочности имеют вид:

- при переменном напряжении:

$$E_{np} = 18,31 + 2,73U_{pj}, \quad (8)$$

- при постоянном напряжении:

$$E_{np} = 21,88 + 3,33U_{pj}. \quad (9)$$

С доверительной вероятностью  $\beta = 0,997$  распределение значений электрической прочности соответствует нормальному закону.

Доверительные интервалы для математического ожидания  $a_E$  и дисперсии  $\sigma_E^2$  соответственно равны:  
 - при переменном напряжении:

$$15,9 \text{ кВ/мм} \leq a_E \leq 20,8 \text{ кВ/мм}, \quad (10)$$

$$1,67 \text{ кВ/мм} \leq \sigma_E^2 \leq 5,37 \text{ кВ/мм}; \quad (11)$$

- при постоянном напряжении:

$$18,9 \text{ кВ/мм} \leq a_E \leq 24,9 \text{ кВ/мм}, \quad (12)$$

$$2,04 \text{ кВ/мм} \leq \sigma_E^2 \leq 6,56 \text{ кВ/мм}. \quad (13)$$

Функции распределения электрической прочности покрытий показаны на рисунке 2.

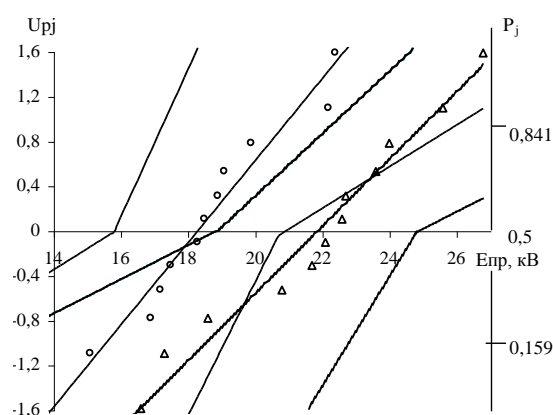


Рис. 2. Распределение полученных на образцах экспериментальных значений электрической прочности покрытия при переменном (о) и постоянном (Δ) напряжении с доверительными интервалами

Анализ полученных результатов исследований показал следующее:

- при контактных давлениях 260 МПа по электрической прочности разработанный материал близок к фторопласту, однако при использовании в качестве покрытия, формируемого вихревым напылением в псевдооживленном слое, вследствие колебаний по толщине он имеет среднее квадратическое рассеивание этого параметра, при постоянном напряжении и переменном напряжении соответственно равное 3,3 кВ и 2,7 кВ при близких значениях коэффициента вариации (см. табл. 2);

- при переменном напряжении электрическая прочность исследуемого покрытия в  $\sim 1,2$  раза ниже, чем при постоянном (см. табл. 2 и рис. 2);

- на электрическую прочность покрытия существенное влияние имеют разнотолщинность и наличие поверхностных дефектов в виде раковин;

- прочностные свойства покрытия из полимерной порошковой композиции – термопластичный «Терамид» на основе полиамида-6 [8], сформированного вихревым напылением в псевдооживленном слое соответствуют предъявляемым к ним требованиям сохранения работоспособности и необходимой электрической прочности при контактных давлениях, не менее 260 МПа (разрушение покрытий происходило при существенно больших контактных давлениях).

Дополнительно проведенные исследования показали, что исходные свойства материала и принятая в качестве базовой технология формирования покрытий обеспечивает близкие к приведенным прочностные и электроизолирующие свойства при температуре минус 50°C до плюс 80°C и после нахождения в условиях повышенной влажности.

В соответствии с полученными результатами с учетом обеспечения электрической прочности изолирующих фланцев и необходимости обеспечения их повышенной надежности были сформулированы следующие основные требования к покрытиям, технологии их формирования, методам и средствам оценки их служебных свойств:

- толщина покрытия на фланцах должна быть не менее 0,4 мм;

- изолирующее покрытие должно быть равномерным со стороны уплотнительных поверхностей, разброс по толщине покрытия на поверхностях не должен превышать 0,2 мм;
- покрытие со стороны уплотнительных поверхностей не должно иметь отслоений, вздутий, пор, трещин и сколов, видимых невооруженным глазом;
- оценка прочности при сжатии и электрической прочности при контроле качества покрытий в процессе производства изолирующих фланцев могут быть совмещены и реализованы при комнатной температуре.



Рис. 3. Опытный образец фланцев электроизолирующих в сборе

В соответствии с этими требованиями были сформированы электроизолирующие покрытия на фланцах, приведенных на рисунке 3. На рисунке 3 фланцы показаны в сборе со сплошным замкнутым покрытием.

Анализ результатов исследований параметров покрытий и их электрической прочности показал следующее:

- формирование на фланцах покрытий вихревым напылением в псевдооживленном слое обеспечивает требуемое качество покрытий, их прочность при сжатии не менее 260 МПа и электрическую прочность не менее 3 кВ, однако его формирование целесообразно осуществлять на автоматизированных установках;
- традиционное размещение электроизолирующих элементов на опорных поверхностях и в отверстиях фланцев не может обеспечить электрическую прочность, более 1,3...1,5 кВ вследствие возникновения воздушного пробоя, приводящего к их разрушению;
- наиболее целесообразно формирование электроизолирующего замкнутого покрытия на всей поверхности фланцев;
- при изготовлении фланцев, кроме оценки электрической прочности, на образцах-свидетелях обязательной операцией технологического контроля этого параметра должны быть испытания фланцевого соединения в сборе.

В соответствии с полученными результатами была разработана конструкция фланцевого соединения [10] и ТУ РБ 190410065.001-2004, регламентирующие требования к покрытиям и их контролю в процессе изготовления.

**Выводы.** Предложенная конструкция электроизолирующего фланцевого соединения, технология формирования на его элементах электроизолирующих покрытий и методы контроля его служебных свойств позволяют обеспечить электрическую прочность не менее 3 кВ.

Разработанные изолирующие фланцы могут быть использованы не только в системах магистральных газопроводов, но и газопроводов «низких» сетей, технологических обвязок нефтехимических и других предприятий, где требуется разделение трубопроводов на электрически независимые участки.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Пат. РФ на изобретение № 2162981 «Фланцевое соединение на высокое давление с диэлектрическим разъемом трубопровода» (кл. F16L 25/02, опубл. 10.02.2001, БИ № 4).
2. Пат. РФ на изобретение № 2174637 «Диэлектрическое фланцевое соединение трубопровода» (кл. F16L 25/03, опубл. 10.10.2001, БИ № 28).
3. Пат. РФ на изобретение № 2174638 «Токоизолирующее соединение для трубопровода» (кл. F16L 25/03, опубл. 10.10.2001, БИ № 28).
4. Пат. РФ на изобретение № 2168103 «Фланцевое соединение трубопроводов» (кл. F16L 23/02, опубл. 27.05.2001, БИ № 15).
5. Пат. США № 4530526, кл. F 16 L 27/06, опубл. 1985.
6. Рекомендации по применению изолирующих фланцев на трубопроводах // Всесоюз. науч.-исслед. ин-т по строительству магистральных трубопроводов «ВНИИСТ». – М.: ОПТИ ВНИИСТа, 1968. – 29 с.
7. ГОСТ 25660-83. Фланцы изолирующие для подводных трубопроводов на  $P_y$  10,0 МПа ( $\approx 100$  кгс/см<sup>2</sup>). Конструкция и размеры.
8. Положительное решение от 28.11.2005 г. по заявке на изобретение № 2004129387/04. МПК С 09 D 177/00. Композиция для получения герметизирующих покрытий / В.А. Струк, В.И. Кравченко, Г.А. Костюкович, Е.В. Овчинников, В.Л. Басинюк, И.И. Герасимчик, И.А. Шкурский.
9. Методика ускоренных сравнительных испытаний цилиндрических зубчатых колес / В.П. Гордовский, О.В. Берестнев О.В., В.Л. Басинюк, В.К. Дубовский. ВНИИВИД ВНО «Ремдеталь», «ИНДМАШ» АН БССР / ГОСНИТИ. – М., 1988. – 65 с.
10. Пат. РБ 1658. Фланцевое соединение трубопроводов / В.Л. Басинюк, И.И. Герасимчик, Н.Н. Максимченко, Е.В. Овчинников, В.А. Ханецкий, И.А. Струк.
11. ТУ РБ 190410065.001-2004. Фланцы в сборе изолирующие.