

УДК 621.315.2

DOI: 10.24160/1993-6982-2018-2-53-58

Исследование продольной герметизации судовых кабелей с помощью водоблокирующих материалов

М.А. Боев, Н.Е. Молчанов, А.А. Косилов

Рассмотрены современные способы герметизации внутреннего объема судовых герметизированных кабелей связи, эксплуатируемых на подводных судах. Отмечены недостатки и преимущества каждого способа герметизации как с точки зрения технологии производства кабелей, так и с позиции эксплуатации герметизированных кабелей в составе бортовых кабельных сетей.

Представлен дизайн новых аналогичных конструкций судовых кабелей с двумя различными способами герметизации: с использованием герметика и с помощью сухих водоблокирующих материалов. Выявлены различия механизмов распространения воды вдоль конструкций кабелей, выполненных с помощью различных способов герметизации. Описана стандартная методика испытаний судовых герметизированных кабелей на продольное гидростатическое давление, а также дан краткий обзор оборудования для проведения подобных испытаний.

Приведены теоретические модели проникновения воды по внутреннему объему кабеля и расчет длины канала распространения воды вдоль кабеля. Получены результаты испытаний на стойкость к воздействию продольного гидростатического давления воды 6...9 МПа (60...90 кгс/см²) судовых герметизированных кабелей двух аналогичных конструкций, отличающихся способами герметизации. Выполнено сравнение данных расчета теоретической длины канала распространения воды с результатами экспериментальных исследований. При этом отмечено значительное влияние радиального гидростатического давления на образец кабеля при испытании на стойкость кабеля к воздействию продольного гидростатического давления.

Ключевые слова: гидростатическое давление, длина канала распространения воды, водоблокирующие материалы, герметизированный судовый кабель.

Для цитирования: Боев М.А., Молчанов Н.Е., Косилов А.А. Исследование продольной герметизации судовых кабелей с помощью водоблокирующих материалов // Вестник МЭИ. 2018. № 2. С. 53—58. DOI: 10.24160/1993-6982-2018-2-53-58.

Studying the Longitudinal Sealing of Shipboard Cables by Means of Waterproofing Materials

M.A. Boev, N.E. Molchanov, A.A. Kosilov

Modern methods applied for sealing the internal volume of sealed communication cables used in submarines are considered. The shortcomings and advantages of each sealing method are pointed out both from the viewpoint of the cable manufacturing technology and from the viewpoint of using sealed cables in the onboard cable networks.

The article presents new similar shipboard cable designs involving two different sealing methods: one with using a sealant and the other with using dry waterproofing materials. The differences between the mechanisms governing water propagation along the cable structures made using different sealing methods are considered. The standard procedure for testing sealed shipboard cables for longitudinal hydrostatic pressure is described, and the equipment used for carrying out such tests is briefly reviewed.

Theoretical models describing water penetration over the cable internal volume are presented, and the calculation for determining the water channel propagation length along the cable is given. The results from testing sealed shipboard cables of two similar designs (but differing in the sealing methods) for resistance to the effect of longitudinal hydrostatic water pressure of 6...9 MPa (60...90 kgf/cm²) have been obtained. The calculated theoretical length of the water propagation channel is compared with the results of experimental investigations. It is pointed out that the radial hydrostatic pressure applied to the cable sample has a significant effect on the cable resistance in testing it for the effect of longitudinal hydrostatic pressure.

Key words: hydrostatic pressure, water propagation channel length, waterproofing materials, sealed shipboard cable.

For citation: Boev M.A., Molchanov N.E., Kosilov A.A. Studying the Longitudinal Sealing of Shipboard Cables by Means of Waterproofing Materials. MPEI Vestnik. 2018;2:53—58. (in Russian). DOI: 10.24160/1993-6982-2018-2-53-58.

Для эксплуатации на судах требуются кабели, сохраняющие работоспособность при воздействии в продольном и радиальном направлениях гидростатического давления до 10 МПа (100 кгс/см²). Для обеспечения герметизации при данном давлении в конструкцию кабеля включают специальные элементы, в качестве которых, как правило, используют:

- различные вязкие жидкости (герметики), которыми заполняют пустоты во внутреннем пространстве под оболочкой кабеля;
- специальные сухие элементы (порошки, нити и ленты), которые при контакте с водой разбухают и действуют так же, как герметики.

В производстве судовых кабелей герметики применяют весьма широко, благодаря отработанной технологии наложения. Большим преимуществом герметика является способность заполнять все пустое пространство кабеля, что обеспечивает надежную герметизацию, и они неприхотливы в хранении. Однако, герметизированный кабель становится менее гибким, а гибкость — весьма важное свойство для судовых кабелей. Кроме того, многие герметики ухудшают показатели пожарной безопасности, приобретают требуемые герметизирующие свойства только при нагреве или при воздействии многократного механического изгиба. Кабель имеет большую погонную массу. Технология его производства — сложна, с увеличением объема внутреннего свободного пространства затрудняется процесс герметизации. Герметики значительно снижают параметры передачи информационных кабелей, кроме того не исследовано влияние герметика на величину электрического сопротивления изоляции.

Водоблокирующие нити и ленты (ВБ-материалы), разбухающие при контакте с водой и блокирующие дальнейшее проникновение воды, до настоящего времени не применяли на отечественном производстве в конструкциях судовых герметизированных кабелей, эксплуатируемых при высоких давлениях (свыше 6 МПа) [1]. Однако за рубежом их широко используют. ВБ-материалы требуют хранения в закрытой упаковке и сухом помещении. Данный способ герметизации не снижает гибкости кабеля, а технологический процесс наложения нитей и лент может быть совмещен с другими операциями при производстве кабелей. Кроме того, многие герметики состоят из нескольких компонентов, которые необходимо смешивать перед наложением на кабель, а ВБ-материалы покупают сразу готовыми к применению. Этот способ герметизации позволяет разрабатывать и производить кабели практически любых размеров с нулевой протечкой и практически не влияет на гибкость исходной конструкции. Кабель с ВБ-материалами имеет меньшие массогабаритные показатели. Наличие в сердечнике ВБ-нитей и лент незначительно влияет на параметры передачи в информационных кабелях, более того, технология производства не предусматривает дополнительных операций и от-

дельного оборудования. Герметики часто состоят из нескольких компонентов, которые приходится смешивать перед наложением, а водоблокирующие материалы можно применять сразу, без опасений о вероятном отверждении герметизирующего состава до его попадания в сердечник кабеля.

Рассмотрена математическая модель расчета количества ВБ-материалов, необходимого для обеспечения стойкости судового кабеля к заданному уровню продольного гидростатического давления с допустимой величиной протечки. Исследована продольная герметичность при давлении 6,08 МПа (60 кгс/см²) двух типов кабелей марок КВПЭфМЛ-5е 4×2×0,52 (рис. 1, а) и КВПЭфМ-5 4×2×0,52. (рис. 1, б), изготовленных по ТУ16.К99-020–2009.

Для процесса продольного распространения воды в кабеле, герметизация которого выполнена на основе ВБ-материалов, предложим следующую математическую модель. Процесс распространения воды вдоль кабеля условно можно разбить на две стадии. Первая стадия — быстрая, когда происходит только разбухание ВБ-материала, а вода распространяется практически свободно по воздушным каналам, при этом процесс ее распространения подчиняется закону Бернулли. Начальную длину распространения воды рассчитаем с помощью формулы Пуазейля. Вторая стадия наступает, когда ВБ-материалы впитают в себя достаточное количество воды, чтобы перекрыть канал, и процесс распространения влаги вдоль конструкции следует рассматривать как диффузию воды сквозь образовавшуюся гелеобразную массу. Аналогичное описание процессов, происходящих при распространении воды вдоль кабельной конструкции, содержится в [2, 3]. Данная физическая модель рассмотрена при условии, что давление воды составляет не более 9807 Па.

При давлении воды 6...9 МПа (60...90 кгс/см²) можно предположить наличие первой стадии, при которой только происходит насыщение ВБ-материалов водой, а канал еще не перекрыт и вода распространяется по кабелю в соответствии с законом Бернулли. На второй стадии, когда нить полностью набухла, а гелеобразная масса заполнила все пустоты внутри конструкции кабеля, помимо диффузии происходит движение геля по каналам за счет большого давления, т. е. движение не-ньютоновской жидкости [4], вязкость которой зависит от напряжения сдвига. Производители ВБ-материалов не приводят в своих каталогах величину вязкости образующего геля, кроме того она может меняться в зависимости от степени насыщения водой в процессе испытания, что усложняет математическую модель и делает ее неудобной для инженерных расчетов. Кроме того, при испытаниях наблюдался выход воды и/или геля из кабеля на торце образца [5, 6].

Испытания данных кабелей на продольную герметичность проводили по общей методике в соответствии с [7]. Образец кабеля длиной 2 м погружали в бак гид-

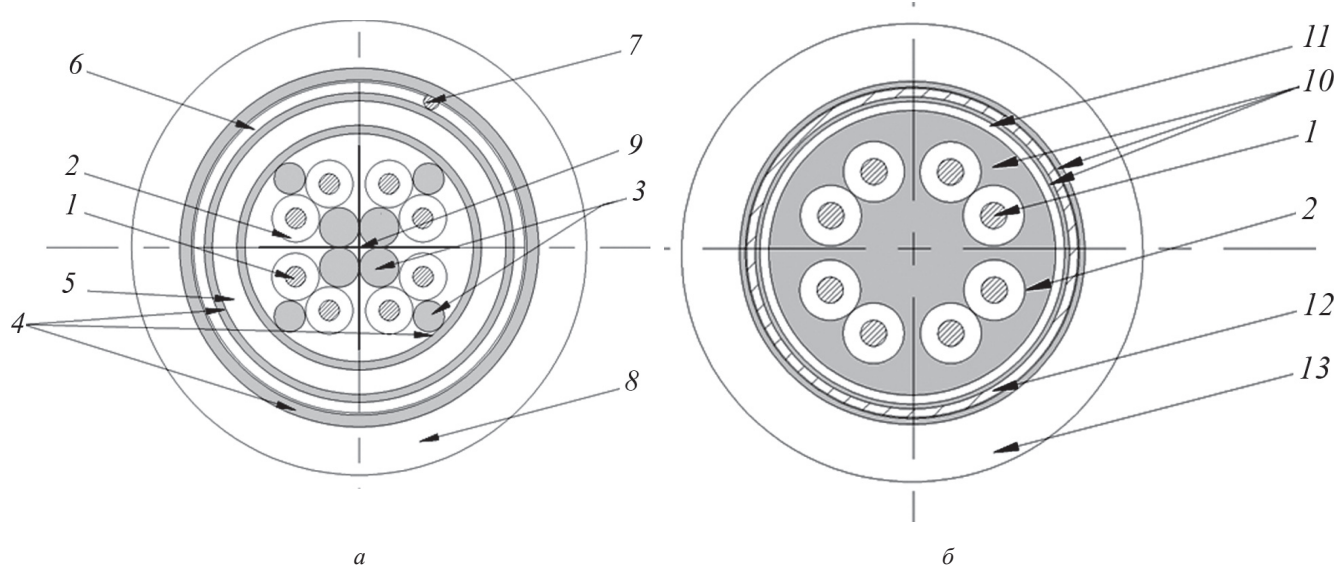


Рис. 1. Конструкции судовых кабелей марок КВПЭФМЛ-5е 4×2×0,52 и КВПЭФМ-5 4×2×0,52, герметизированных с помощью ВБ-материалов (нити, ленты) (а) и герметика (б):

1 — токопроводящая жила из медной мягкой проволоки диаметром 0,52 мм; 2 — изоляция жилы из полиэтилена (диаметр по изоляции 1,20 мм); 3 — водоблокирующие нити (диаметр в сухом состоянии 1,3 мм); 4 — водоблокирующая лента толщиной 0,22 мм (если идти от сердечника: лента сердечника; внутренняя и внешняя ленты); 5 — внутренняя оболочка (диаметр 7,4 мм); 6 — экран в виде обмотки из ламинированной алюминиевой фольги; 7 — контактный проводник; 8 — оболочка из полимерного материала, не содержащего галогенов; 9 — крестообразный разделитель из полиэтилена; 10 — герметизирующий наполнитель на основе низкомолекулярного каучука; 11 — поясная изоляция из полимерной композиции, не содержащей галогенов (диаметр 6,28 мм); 12 — экран в виде обмотки лентой из ламинированной алюминиевой полимерной пленки, наложенной поверх контактно-проводника; 13 — оболочка из полимерного материала, не содержащего галогенов

ростатического давления так, чтобы один конец длиной 1 м находился внутри бака, а другой конец длиной 1 м снаружи (рис. 2). Узел ввода кабеля в бак содержал уплотнение, выполненное из эпоксидной смолы, обладающей хорошей адгезией к оболочке кабеля и отсутствием деформации при воздействии радиального гидростатического давления. Таким образом, исключалось дополнительное пережатие кабеля в узле ввода во время испытания, которое проходило в два этапа.

В соответствии с требованиями [7] на первом этапе испытаний оценивали конструктивно-технологический запас испытываемого кабеля, для чего создавали давление на 50 % больше рабочего. В нашем случае для испытываемых образцов рабочее давление составляло 6,08 МПа (60 кгс/см²). При испытании скорость повышения гидростатического давления равна 1 МПа/мин. Повышенное давление первого этапа испытаний — 9 МПа (90 кгс/см²), образец при данном давлении выдерживали 15 мин, затем давление понижали до 0,2 МПа.

На втором этапе испытаний давление повторно повышали до рабочего. Выдержка, в соответствии с требованиями ТУ16.К99-020-2009, составила 120 мин.

После испытания по стандарту оценивали объем протечки (объем просочившейся воды) через торец наружного конца образца кабеля и сравнивали полученное значение с допустимым значением 100 см³. Результаты испытаний исследуемых конструкций кабелей представлены в табл. 1.

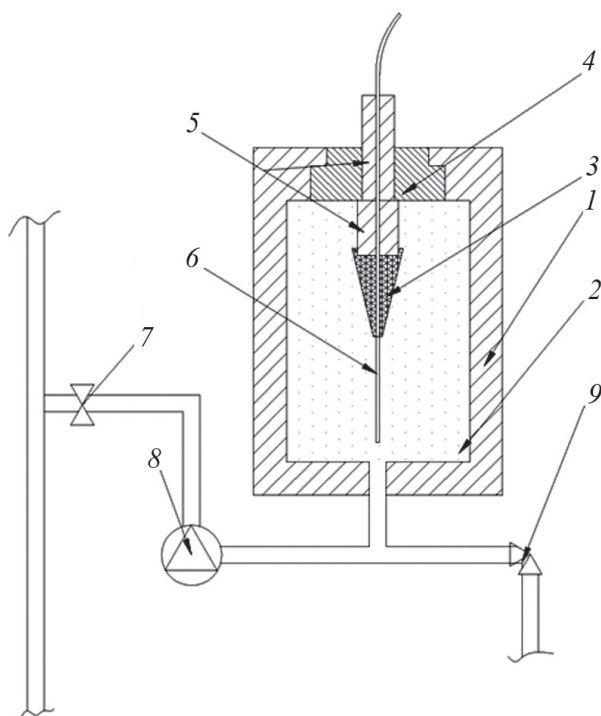


Рис. 2. Схема расположения образца в баке при испытании на воздействие гидростатического давления:

1 — бак; 2 — вода; 3 — уплотнение из эпоксидной смолы; 4 — крышка бака; 5 — вспомогательные втулки уплотнения; 6 — испытываемый образец; 7 — клапан; 8 — насос; 9 — сливной клапан

Результаты испытаний кабелей на продольную герметичность

Параметр	Марка кабеля	
	КВПЭфМЛ-5е 4×2×0,52 (крест)	КВПЭфМ-5 4×2×0,52
Объем протечки, см ³	0	19
Длина канала распространения воды по элементам конструкции кабеля (см. рис. 1)	1550 мм по сердечнику (3) 290 мм по внутренней ленте (4) 320 мм по внешней ленте (4)	2000 мм между поясной изоляцией (11) и экраном (12)

Механизмы распространения воды вдоль кабеля у двух исследуемых конструкций различны. Герметизацию кабеля марки КВПЭфМЛ-5е 4×2×0,52 обеспечивали с помощью герметика. В кабеле вода распространялась исключительно по воздушным полостям, куда не попал герметик. Очевидно, что чем меньше таких полостей, тем более герметичной будет конструкция. Этого можно добиться путем усовершенствования технологии изготовления, что весьма затруднительно, поскольку используемый герметик достаточно вязкий. В местах перекрытия ленты экрана часто есть маленький канал, куда он не попадает, и по которому может распространяться вода при высоком давлении.

Рассчитана длина канала распространения воды для кабеля марки КВПЭфМЛ-5е 4×2×0,52, которую по внешней и внутренней лентам, находящимся под внешней оболочкой и экраном кабеля, определили по следующей формуле

$$l = \sqrt{\frac{\Delta p ((R_2 - R_1) k_c)^3}{18 \eta \nu k}}, \quad (1)$$

где l — длина канала распространения воды; Δp — величина давления, при котором проводились испытания, $\Delta p = 6$ МПа; R_1 , R_2 — внутренний и внешний радиусы канала, где расположен ВБ-материал; η — кинематическая вязкость воды, при температуре 20 °С равная $1,0 \cdot 10^{-3}$ Па·с; ν — скорость водопоглощения ВБ-материала; k_c — коэффициент, учитывающий сжатие кабеля в радиальном направлении; k — коэффициент укрутки.

В процессе испытания (рис. 2) на образец воздействует гидростатическое давление в продольном и в радиальном направлениях, из-за чего воздушный промежуток, где находится ВБ-материал уменьшается. Экспериментальные исследования показали, что при давлении воды 6 МПа уменьшение воздушного промежутка достигает 90 %, при этом коэффициент k_c составляет 0,1.

Длину распространения воды по сердечнику рассчитывали по формуле

$$l = \sqrt{\frac{\pi \Delta p (R_{23} - R_1)^3 (3R_{23} + 2R_1)}{120 \eta u m k}}, \quad (2)$$

где R_1 , R_{23} — внешний и внутренний радиусы воздушной полости, приходящейся на один кордель из ВБ-нити; u — скорость поглощения воды корделем из ВБ-материала; m — линейная плотность ВБ-материала.

Внешний радиус воздушной полости, приходящий на одну нить из ВБ-материала, равен

$$R_{23} = \sqrt{\frac{D_c^2 - n d_{из}^2}{4K}}, \quad (3)$$

где D_c — диаметр сердечника; n — количество токопроводящих жил, $n = 8$; $d_{из}$ — диаметр токопроводящих жил по изоляции, $d_{из} = 1,2$ мм; K — количество корделей.

Полученные по (1) — (3) результаты расчета приведены в табл. 2, 3.

Таблица 2

Результаты теоретического расчета длины канала распространения воды по ВБ-лентам, входящим в конструкцию кабеля марки КВПЭфМЛ-5е 4×2×0,52, при давлении 6 МПа

Элемент конструкции	Параметр					
	R_1 , мм	R_2 , мм	η , Па·с	ν , м/с	k	l , мм
внешняя лента (4, рис. 1, а)	4,5	3,935	$1,0 \cdot 10^{-3}$	$1,0 \cdot 10^{-4}$	1,30	680
внутренняя лента (4, рис. 1, а)	3,87	3,68	$1,0 \cdot 10^{-3}$	$1,0 \cdot 10^{-4}$	1,30	133

Таблица 3

Результаты теоретического расчета длины распространения воды по сердечнику кабеля марки КВПЭфМЛ-5е 4×2×0,52 при давлении 6 МПа

Элемент конструкции	Параметр					
	R_1 , мм	R_{23} , мм	m , кг/м	u , м ³ /кг·с	k	l , мм
сердечник кабеля (3, рис. 1, а)	0,65	0,74	$5,0 \cdot 10^{-4}$	$7,16 \cdot 10^{-4}$	1,30	931

Расчет длины распространения воды по ВБ-материалам в виде ленты показал сходимость теоретических значений с итогами испытаний. Следует отметить, что для результатов испытаний на воздействие продольного гидростатического давления характерна большая дисперсия полученных результатов. Кроме того, степень воздействия гидростатического давления в радиальном направлении зависит от применяемых материалов и конструкции кабеля.

Результат расчета длины распространения воды по сердечнику из ВБ-материала в виде нитей совпал с экспериментальными данными с определенной точностью, даже без учета воздействия радиального давления, поскольку в настоящей конструкции предусмотрен разделитель в виде полиэтиленового креста, препятствующий значительной деформации сердечника кабеля.

Таким образом, результаты испытаний судовых герметизированных кабелей на стойкость к продольному гидростатическому давлению показали наличие зависимости от воздействия давления на кабель в радиальном направлении.

С одной стороны, если конструкция кабеля сильно деформируется, что способствует уменьшению зазоров между элементами, то кабель становится более стоек к продольному давлению, а следовательно меньше воды просочится через образец. Однако, сама по себе деформация кабеля отрицательно влияет на электрические параметры [8, 9]. С другой стороны, если конструкция кабеля такова, что деформация под воздействием радиального давления незначительна, то вода может просочиться в большем количестве.

Приведенные расчеты позволяют ориентировочно оценить длину распространения воды по сечению кабеля в продольном направлении с учетом радиального гидростатического давления.

Литература

1. Кильмухаметов М.Д., Садретдинов И.Ф. Обзор современных технологий получения суперabsorbiruyushchih Polimerov (SAP) dlya kompleksa Akrilovoy Kisloty ОАО «Газпром Нефтехим Салават» // Башкирский химический журнал. 2014. № 2. Т. 21. С. 5—14.
2. Шолуденко М.В., Геча Э.Я. Продольная влагопроницаемость кабелей парной скрутки с элементами из водоблокирующих материалов // Кабели и провода. 2009. № 2 (315). С. 8—13.
3. Ларин Ю.Т. Оптические кабели. М.: Престиж, 2006.
4. Gruhn J.D. Characterizing and Selecting Superabsorbing Cable Components // Proc. 47th IWCS. 1998. Pp. 126—134.
5. Барашков. О.К. Сшитые полимеры в кабелях связи: особенности поглощения воды // Первая миля. 2015. № 1 (46). С. 36—37.
6. Suda Kiatkamjornwong. Superabsorbent Polymers and Superabsorbent Polymer Composites // Sci. Asia. 2007. No. 1. Pp. 39—43.
7. ГОСТ 20.57.406—81. Комплексная система контроля качества. Изделия электронной техники, квантовой электроники и электротехнические. Методы испытаний.
8. Лобанов А.В. Молчанов Н.Е. Исследование зависимости параметров передачи судовых симметричных кабелей от гидростатического радиального давления // Кабели и провода. 2017. № 2 (363). С. 8—12.
9. Леонов В.М., Пешков И.Б., Рязанов И.Б., Холодный С.Д. Основы кабельной техники. М.: Академия, 2006.

References

1. Kil'muhametov M.D., Sadretdinov I.F. Obzor Sovremennyh Tekhnologiy Polucheniya Superabsorbiruyushchih Polimerov (SAP) dlya Kompleksa Akrilovoy Kisloty ОАО «Gazprom Neftekhim Salavat». Bashkirskiy Khimicheskij Zhurnal. 2014;2;21: 5—14. (in Russian).
2. Sholudenko M.V., Gecha E.Ya. Prodol'naya Vlagopronitsaemost' Kabeley Parnoy Skrutki s Elementami iz Vodobokiruyushchih Materialov. Kabeli i Provoda. 2009;2 (315):8—13. (in Russian).
3. Larin Yu.T. Opticheskie Kabeli. M.: Prestizh, 2006. (in Russian).
4. Gruhn J.D. Characterizing and Selecting Superabsorbing Cable Components. Proc. 47th IWCS. 1998:126—134.
5. Barashkov. O.K. Sshitye Polimery v Kabelyah Svyazi: Osobennosti Pogloshcheniya Vody. Pervaya Milya. 2015;1 (46):36—37. (in Russian).
6. Suda Kiatkamjornwong. Superabsorbent Polymers and Superabsorbent Polymer Composites. Sci. Asia. 2007;1:39—43.
7. GOST 20.57.406—81. Kompleksnaya Sistema Kontrolya Kachestva. Izdeliya Elektronnoy Tekhniki, Kvantovoy Elektroniki i Elektrotekhnicheskie. Metody Ispytaniy. (in Russian).
8. Lobanov A.V. Molchanov N.E. Issledovanie Zavisimosti Parametrov Peredachi Sudovyh Simmetrichnyh Kabeley ot Hidrostaticheskogo Radial'nogo Davleniya. Kabeli i Provoda. 2017;2 (363):8—12. (in Russian).
9. Leonov V.M., Peshkov I.B., Ryazanov I.B., Holodnyy S.D. Osnovy Kabel'noy Tekhniki. M.: Akademiya, 2006. (in Russian).

Сведения об авторах

Боев Михаил Андреевич — доктор технических наук, профессор кафедры физики и технологии электротехнических материалов и компонентов НИУ «МЭИ», член-корреспондент Академии электротехнических наук РФ, лауреат премии Правительства РФ, e-mail: maboev@mail.ru

Молчанов Никита Евгеньевич — аспирант кафедры физики и технологии электротехнических материалов и компонентов НИУ «МЭИ», инженер-испытатель ООО НПП «Спецкабель», e-mail: teilor2010@gmail.com

Косилов Артем Андреевич — инженер-технолог ООО НПП «Спецкабель»

Information about authors

Boev Mikhail A. — Dr.Sci. (Techn.), Professor of Physics and Technologies of Electrical Materials and Components Dept., NRU MPEI, Corresponding Member of Academy of Electrotechnical Sciences of the Russian Federation, Laureate of RF Government Prize, e-mail: maboev@mail.ru

Molchanov Nikita E. — Ph.D.-student of Physics and Technologies of Electrical Materials and Components Dept., NRU MPEI, Test Engineer of Open Company «Spetskabel», e-mail: teilor2010@gmail.com

Kosilov Artem A. — Engineer-technologist of Open Company «Spetskabel»

Статья поступила в редакцию 16.06.2017