

СЕКЦИЯ 2

Гражданское судостроение. Освоение океана и арктической зоны

Ильин А.А., Джиоева Т.Б.

Филиал «ЦНИИ СЭТ» ФГУП «Крыловский государственный научный центр», Санкт-Петербург, Россия

АНАЛИЗ ХАРАКТЕРИСТИК МАТЕРИАЛОВ, ПРИМЕНЯЕМЫХ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ТРУБОПРОВОДОВ, С ЦЕЛЬЮ СНИЖЕНИЯ ЭЛЕКТРИЗАЦИИ ПРИ ПЕРЕКАЧКЕ УГЛЕВОДОРОДОВ

Статья посвящена анализу материалов, применяемых для изготовления трубопроводов современных судов, выявлению их преимуществ и недостатков, а также определению перспективных материалов и покрытий, пригодных для изготовления трубопроводов для перекачки углеводородов с точки зрения электростатической искробезопасности. Анализ произведен на основе определения токов заряжения жидкости, электрического сопротивления материалов с учетом таких факторов, как плотность материала и коррозионная стойкость.

Ключевые слова: статическое электричество, трубопроводы, композитные материалы, металлы, покрытия.

Авторы заявляют об отсутствии возможных конфликтов интересов.

Для цитирования: Ильин А.А., Джиоева Т.Б. Анализ характеристик материалов, применяемых для изготовления трубопроводов, с целью снижения электризации при перекачке углеводородов. Труды Крыловского государственного научного центра. 2018; специальный выпуск 1: 55–61.

УДК 629.5.063.6/.7

DOI: 10.24937/2542-2324-2018-1-S-1-55-61

SECTION 2

Commercial shipbuilding. Ocean and offshore arctic engineering

Ilin A., Dzhioeva T.

Ship Electric Engineering & Technology Research Institute (TSNII SET), affiliated branch of Krylov State Research Centre, St. Petersburg, Russia

ANALYSIS OF MATERIAL PROPERTIES FOR FABRICATION OF PIPELINES AIMED AT REDUCING ACCUMULATION OF STATIC ELECTRICITY IN THE PROCESS OF HYDROCARBONS PUMPING

This paper is concerned with the analysis of materials used for fabrication of modern ship pipelines to identify their merits and disadvantages, as well as to find advantageous materials and coatings for pipelines intended for transfer of hydrocarbons to ensure electrostatic sparking safety. The analysis is based on determination of charging currents in fluids, electric resistance of materials taking into consideration material density and corrosion resistance.

Key words: static electricity, pipelines, composite materials, metals, coatings.

Authors declare lack of the possible conflicts of interests.

For citations: Ilin A., Dzhioeva T. Analysis of material properties for fabrication of pipelines aimed at reducing accumulation of static electricity in the process of hydrocarbons pumping. Transactions of the Krylov State Research Centre. 2018; special issue 1: 55–61 (in Russian).

UDC 629.5.063.6/.7

DOI: 10.24937/2542-2324-2018-1-S-1-55-61



Введение

Introduction

В реальных условиях при совершении погрузочных операций в трубопроводе происходит преимущественно генерация электрических зарядов, т.е. электронизация топлива за счет преобладания токов заряжения жидкости над токами релаксации (обратной утечки заряда на стенки трубы).

В грузовых танках происходит накопление и релаксация заряда. Таким образом, электростатическое поле в танке формируется в зависимости от величины поступающего из трубопровода электрического заряда, скорости его релаксации на заземленные стенки сосудов и пространственного распределения объемного заряда [1].

С целью повышения надежности трубопроводов, снижения массы и повышения грузоподъемности и увеличения срока их службы, а также улучшения экономических и мореходных (скорость, остойчивость) характеристик танкеров за рубежом применяют трубопроводы из полимерных композиционных материалов (ПКМ). Основная цель данной работы – сравнение токов заряжения топлива при движении по круглому трубопроводу в зависимости от материала и выбор наиболее безопасного материала.

Современное состояние

State of the art

В соответствии с ГОСТ и ОСТ на отечественных судах применяют трубопроводы из различных видов материалов. Как правило, для перекачки углеводородов и масел применяются виды труб, указанные в табл. 1.

Для судовых трубопроводов наиболее часто применяются стальные бесшовные трубы. К материалам этих труб относятся марки углеродистой стали 10 и 20 обычной точности изготовления. Помимо этих марок,

в зависимости от климатических условий эксплуатации и с ограничением по отраслевому стандарту, на судах могут применяться и другие марки стали. Помимо очевидных достоинств таких труб – невысокой стоимости, надежности, стойкости к высоким и низким температурам, широкому распространению – существуют и их очевидные недостатки – коррозионная стойкость и большая масса.

Основные параметры, влияющие на величину тока заряжения:

- шероховатость внутренней стенки материала;
- удельное объемное электрическое сопротивление.

Композитные материалы: сравнительная характеристика

Composite materials: comparison

Благодаря развитию технологий производства современных композитных материалов и своим «первоклассным» характеристикам, они все чаще встречаются в производстве трубопроводной арматуры для судов, однако пока лишь в ограниченных количествах.

Стеклопластиковые трубы

Стеклопластик – материал с малым удельным весом и заданными свойствами, имеющий широкий спектр применения. Стеклопластики обладают очень низкой теплопроводностью (примерно как у дерева), прочностью как у стали, биологической стойкостью, влагостойкостью и атмосферостойкостью полимеров, не обладая недостатками, присущими термопластам.

Стеклопластики уступают стали по абсолютным значениям предела прочности, но в 3,5 раза легче ее и превосходят сталь по удельной прочности. При изготовлении равнопрочных конструкций из стали и стеклопластика стеклопластиковая конструкция будет в несколько раз легче. Плотность стеклопластика, полученного путем прессования или намотки, составляет 1,8–2,0 г/см.

Таблица 1. Трубы, применяемые в судовых системах и трубопроводах

Table 1. Shipboard pipes and piping systems

| Проводимая среда | Судовые системы или трубопроводы | Трубы |
|------------------|---|---|
| Масло | Трубопроводы: приемные, переливные, сточные напорные, циркуляционные, гидравлического управления | Стальные бесшовные. Стальные бесшовные, допускаются медные и биметаллические |
| | Трубопроводы: приемные, переливные, спускные | Стальные бесшовные, допускаются сварные |
| Нефтепродукты | Трубопроводы: напорные перекачивающие и напорные к форсункам дизелей и котлов легкого топлива (керосин, бензин) | Стальные бесшовные или биметаллические Медные, биметаллические, из нержавеющей стали |

Стеклобазальтопластиковые трубы

Стеклобазальтопластиковые трубы (СБПТ) выдерживают давление до 200 атм и температуру до 130 °С. Срок службы СБПТ значительно дольше стальных труб, пропускная способность – на 30 % выше, а теплопотери – на порядок ниже, чем у труб из стали. Данные трубы по прочности превосходят также полиэтиленовые и полипропиленовые трубы, имеют класс огнестойкости до Г-1 (самозатухающий трудногорючий строительный материал).

СБПТ, изготовленные на эпоксидной основе, по прочности, надежности и долговечности значительно превосходят стеклопластиковые трубы. В напорных трубопроводах (от 12 атм) СБПТ сопоставимы или дешевле стальных, чугунных и пластиковых труб на диаметрах от 150 мм и на 10–30 % дешевле аналогичных стеклопластиковых труб большинства российских и зарубежных производителей. Данные трубы в 4–10 раз легче аналогичных стальных труб и в 2 раза легче полиэтиленовых труб. Сравнительные характеристики металлов и композитов представлены в табл. 2.

Современные покрытия

Modern coatings

Антикоррозионные покрытия применяются для внутренней изоляции труб, транспортирующих коррозионно-агрессивные среды. В нефтегазовой промышленности к таким средам относятся водонефтегазовые эмульсии, пластовая вода, обратная вода системы поддержания пластового давления.

При движении коррозионно-агрессивных жидкостей возникает общая и локальная коррозия. Скорость общей коррозии составляет порядка 0,01–0,4 мм/год, скорость локальной коррозии может достигать 1,5–6 мм/год. Коррозионная агрессивность значительно повышается с появлением в продукции скважин сероводорода как продукта жизнедеятельности сульфатвосстанавливающих бактерий. Коррозионные разрушения стальных трубопроводов приводят к большим материальным потерям и ухудшению экологической обстановки в районах нефтедобычи вследствие порывов труб. Применение порошковых полимеров и лакокрасочных материалов с высоким сухим остатком позволяет улучшить санитарно-гигиенические условия труда, получать практически беспористые покрытия с более высокими защитными и физико-механическими свойствами, сократить производственный цикл окраски за счет возможности нанесения однослойного покрытия для получения требуемой толщины, сократить невозвратимые потери материала при нанесении по сравнению с лакокрасочными материалами, содержащими растворитель. Отсутствие выбросов паров растворителя делает производство экологически более чистым. При сравнении покрытий на основе порошковых полимеров и лакокрасочных материалов с высоким сухим остатком предпочтение отдается последним, т.к. технологический процесс нанесения покрытия из порошковых полимеров является более энергоемким и взрывоопасным. Критериями выбора покрытий для внутренней изоляции труб являются условия

Таблица 2. Сравнительные характеристики металлов и композитов

Table 2. Comparison of metals and composites

| Характеристики | Ст10 | Ст20 | Ст10пс | Ст20пс | Стекло-пластик | Стекло-базальто-пластик |
|--|--------------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|------------------|-------------------------|
| Плотность (кг/м ³) | 7856 | 7859 | 7832 | 7834 | 1750–1888 | 1750–1888 |
| Модуль упругости, ГПа | 200–240 | 245 | 196 | 343 | 27–35 | 27–35 |
| Удельный модуль упругости, км | 2692 | 2692 | 2692 | 2692 | 2895–3056 | –/–/– |
| Удельный предел прочности (для металлов, предел текучести), км | 2,1 | 2,13 | 1,86 | 2,12 | 89–84 | 89–84 |
| Теплопроводность при 20 °С Вт/м грЦ | 64 | 63 | 60 | 62 | 0,3 | 0,4 |
| Эквивалент шероховатости | | 0,04 | | | 0,0015 | |
| Удельное объемное электрическое сопротивление, Ом·м | 140·10 ⁹ | 219·10 ⁹ | 190·10 ⁹ | 219·10 ⁹ | 10 ¹² | 10 ¹² |
| Коррозионная стойкость | Не стойкий без спец. обработки | | | | Стойкий | |

Примечание: Характеристики по композитным материалам были взяты из ГОСТ Р 55068-2012.

эксплуатации трубопровода, защитные и технологические свойства покрытий. По всем параметрам наиболее подходящими для внутренней изоляции труб являются лакокрасочные материалы на основе эпоксидных, модифицированных эпоксидных и фенолформальдегидных смол. Из порошковых полимеров широко применяются покрытия на основе эпоксидных порошковых материалов. Толщина антикоррозионных покрытий, как правило, составляет 300–500 мкм. С точки зрения электростатической искробезопасности нас интересует параметр удельного объемного электрического сопротивления (приведен в табл. 3).

Выбор оптимального материала

Choice of optimum material

В работе [2] представлены результаты экспериментов, проведенных в Московском энергетическом институте, учитывающие шероховатость трубы. Для бесконечно длинного трубопровода была выведена формула (1):

$$I_{\infty} = \frac{0,113 \varepsilon_0 \varepsilon_{жс} Re RTSc^2 V}{nF \left(1,14 - 2 \lg \frac{h_{эжк}}{d} \right)}, \quad (1)$$

где $Re = dV/\nu$ – число Рейнольдса; ε_0 – электрическая постоянная вакуума; $\varepsilon_{жс}$ – относительная диэлектрическая проницаемость жидкости; R – универсальная газовая постоянная; T – абсолютная температура жидкости; n – число переноса ($n = 0,5$); F – число Фарадея; $h_{эжк}$ – размер зерна эквивалентной песочной шероховатости; d – внутренний диаметр фиксированный, составляет $d = 100$ мм; $Sc = \nu/D$ – число Шмидта; ν – кинематическая вязкость жидкости; D – коэффициент молекулярной диффузии, в $см^2/с$ для жидкостей, принимается равным 10^{-5} ; $V = 0,8$ м/с.

Коэффициент сопротивления шероховатости труб зависит от состояния их поверхности, которое принято оценивать по относительной высоте бугорков (шероховатости) $h_{эжк}$. Однако эта величина не

может полностью характеризовать все очень разнообразные виды шероховатости, и с целью упрощения задачи вводится понятие о песочной шероховатости, образованной зёрнами одного и того же размера, распределёнными по поверхности с максимальной плотностью [3]. Формула для расчета размера эквивалентной песочной шероховатости –

$$h_{эжк} = 10^{0,5/\sqrt{\Delta_{эжк}} - 0,87}, \quad (2)$$

где $\Delta_{эжк}$ – эквивалент шероховатости труб (приведен в табл. 1).

Основные свойства жидкостей, применяемых для расчетов, приведены в табл. 4, а результаты вспомогательных и основных расчетов – в табл. 5.

Однако в случае использования неметаллических труб [4] и внутренних антикоррозионных покрытий ток вычисляется по следующей формуле:

$$I = I_0 e^{-\frac{x}{\tau\nu}} + I_{\infty} \left(1 - e^{-\frac{x}{\tau\nu}} \right) + A [I_0 - I_{\infty}] \left(\frac{1 - e^{-\lambda}}{\lambda} - e^{-\frac{x}{\tau\nu}} \right). \quad (3)$$

Здесь I_0 – входной ток; $\lambda = l(\nu\tau)^{-1}$ – гидравлическое сопротивление; l – длина трубы; $A = \beta_{жс} \beta_p^{-1}$ – коэффициент; $\beta_p = \beta_{жс} + \beta_m$ – суммарная проводимость; $\beta_{жс} = \pi r_1^2 \gamma_n$ – проводимость жидкости в трубе на единицу длины; $\beta_m = \pi r_2^2 \gamma_m$ – проводимость единицы длины трубы.

Примем следующие допущения: $I_0 = 0$, $x = 0$. Тогда (3) примет вид

$$I = I_{\infty} - A I_{\infty} \left(\frac{1 - e^{-\lambda}}{\lambda} \right). \quad (4)$$

Результаты вычисления для композитных материалов и покрытий приведены в табл. 6.

Из формул (1) и (3), а также табл. 6 можно сделать важные выводы о том, что значение тока для бесконечно длинного трубопровода зависит от:

- выбранного материала – от размера зерна его песочной шероховатости и удельной проводимости

Таблица 3. Сравнительная характеристика антикоррозионных покрытий

Table 3. Comparison of anticorrosion coatings

| Свойство | Пакойл 6/0 | Пакойл 6/3 | Scotckote 226 N | Hempadur 85671 |
|---|------------|------------|---------------------|----------------|
| Удельное объемное электрическое сопротивление, Ом·м | 10^9 | 10^9 | $1,8 \cdot 10^{13}$ | 10^8 |

мости, особенно в случае неметаллических трубопроводов и покрытий;

- физических свойств перекачиваемой жидкости;
- диаметра трубопровода;
- скорости погрузки.

В качестве доказательства безопасности использования композитных труб рассмотрим изменение значения токов в зависимости от скорости

погрузки для одного вида топлива – керосин ТС1 (табл. 7). Данный вид топлива выбран для примера. Аналогичные расчеты можно произвести для любого вида топлива. Для большей наглядности построим график зависимости $I = f(v)$ (рис. 1), а также покажем на примере больших скоростей отклонения значения токов заряжения жидкости между металлом и композитами (рис. 2).

Таблица 4. Основные свойства жидкостей, применяемых для расчета

Table 4. Main properties of fluids used in calculations

| Топливо | Номер | ρ , кг/м ³ | $\epsilon_{ж}$ | $\gamma_{п}$, пСм/м | μ , сСт |
|--------------------------|-------|----------------------------|----------------|----------------------|-------------|
| Керосин ТС-1 | 1 | 780 | 1,8 | 0,48 | 1,3 |
| Бензин А-72 | 2 | 700 | 2 | 0,651 | 0,6 |
| Бензин АИ-93эт | 3 | 725 | 2 | 4,02 | 0,5254 |
| Дизельное топливо летнее | 4 | 860 | 2,1 | 3 | 3 |
| Дизельное топливо зимнее | 5 | 840 | 2,1 | 10,8 | 1,8 |

Таблица 5. Результаты основных и вспомогательных расчетов

Table 5. Results of main and auxiliary estimations

| Номер | Постоянная времени релаксации, τ | Число Рейнольдса, Re | Число Шмидта, Sc | Величина тока для бесконечно длинного трубопровода у металлов I, мкА |
|-------|---------------------------------------|----------------------|--------------------|--|
| 1 | 33,188 | $5,938 \cdot 10^7$ | $1,3 \cdot 10^3$ | 12,3029545567 |
| 2 | 27,189 | $1,28 \cdot 10^8$ | $6,013 \cdot 10^3$ | 63,38209047 |
| 3 | 4,403 | $1,469 \cdot 10^8$ | $5,254 \cdot 10^3$ | 67,997545294 |
| 4 | 6,195 | $2,573 \cdot 10^7$ | $3 \cdot 10^3$ | 9,448588624 |
| 5 | 1,859 | $5,147 \cdot 10^7$ | $1,8 \cdot 10^3$ | 14,637690554 |

Таблица 6. Результаты вычисления для токов заряжения композитных материалов и покрытий

Table 6. Results of estimations for charging currents in composite materials and coatings

| Топливо | Материалы и покрытия | | | | | |
|----------------|------------------------------|--------------------------------------|---------------------------|---------------------------|--------------------------------|-------------------------------|
| | Стеклопластик, I_{m11} мкА | Стеклобазальтопластик, I_{m21} мкА | Пакойл 6/0, I_{n11} мкА | Пакойл 6/3, I_{n21} мкА | Scotckote 226 N, I_{n31} мкА | Hempadur 85671, I_{n41} мкА |
| Керосин ТС-1 | 12,14805088 | 12,14804316 | 12,30294535 | 12,30294535 | 12,30289345 | 12,3029445 |
| Бензин А-72 | 62,58414504 | 62,58412992 | 63,386209005 | 63,386209005 | 63,38198844 | 63,38209037 |
| Бензин АИ-93эт | 67,14151541 | 67,14151312 | 67,99754523 | 67,99754523 | 67,99752985 | 67,99754528 |
| ДТЛ | 9,329635658 | 9,329633103 | 9,448588554 | 9,448588554 | 9,448571383 | 9,448588606 |
| ДТЗ | 14,45341462 | 14,45341403 | 14,63769054 | 14,63769054 | 14,63768655 | 14,63769055 |

Примечание: для большей наглядности числа не округляются после выполнения расчетов.

Таблица 7. Результаты сравнительных вычислений для металлов и композитов в зависимости от скорости движения топлива

Table 7. Results of comparative estimates for metals and composites versus fuel flow rate

| Топливо | Скорость погрузки, v , м/с | Применяемый материал | | | $\Delta I = I_{11} - I_{M11}$ | $\Delta I = I_{11} - I_{M21}$ |
|--------------|------------------------------|-------------------------|--------------------------------|--|-------------------------------|-------------------------------|
| | | Металлы, I_{11} , мкА | Стеклопластик, I_{M11} , мкА | Стеклобазальтопластик, I_{M21} , мкА | | |
| Керосин ТС-1 | 0,1 | 0,1922335 | 0,189813295 | 0,189813174 | 0,0024202 | 0,00242035 |
| | 0,2 | 0,7592539 | 0,75925318 | 0,759252698 | $7,471 \cdot 10^{-7}$ | $1,2297 \cdot 10^{-6}$ |
| | 0,3 | 1,7301017 | 1,708319655 | 1,708318569 | 0,0217820 | 0,02178315 |
| | 0,4 | 3,0757363 | 3,03701272 | 3,03701079 | 0,0387236 | 0,03872560 |
| | 0,5 | 4,8058381 | 4,745332376 | 4,805838029 | 0,0605057 | $8,3 \cdot 10^{-6}$ |
| | 0,6 | 6,9204068 | 6,833278621 | 6,833274277 | 0,0871282 | 0,08713260 |
| | 0,7 | 9,4194426 | 9,300851457 | 9,300845544 | 0,1185912 | 0,11859715 |
| | 0,8 | 12,302945 | 12,14805088 | 12,14804316 | 0,1548946 | 0,15490241 |
| | 0,9 | 15,570915 | 15,3748769 | 15,37486712 | 0,1960385 | 0,19604836 |
| | 1 | 19,223352 | 18,9813295 | 18,98131744 | 0,2420229 | 0,24203501 |

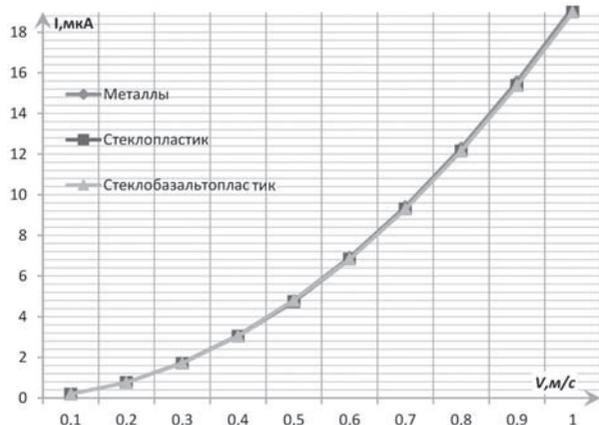


Рис. 1. Зависимость $I = f(V)$

Fig. 1. Relation $I = f(V)$

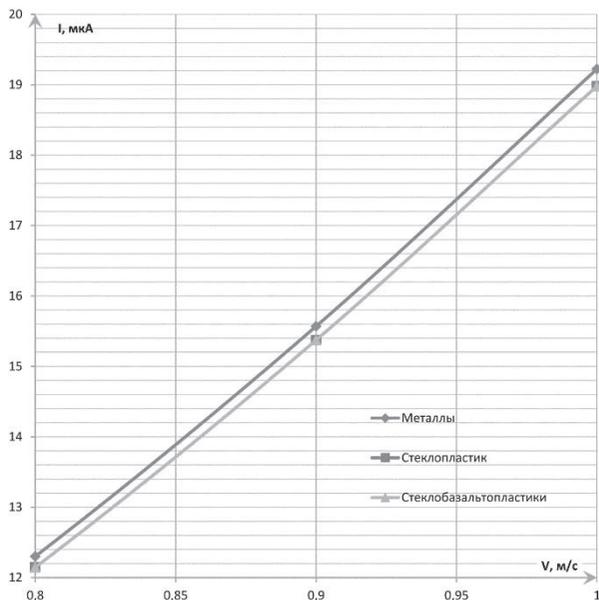


Рис. 2. Отклонение I_{11} от I_{M11} и I_{M21}

Fig. 2. Deviation of I_{11} from I_{M11} and I_{M21}

Вывод

Conclusion

На основе имеющихся данных был проведен анализ токов заряжения жидкости для применяемых материалов. По результатам расчетов наиболее электростатически безопасным следует считать стеклобазальтопластиковые трубы.

Библиографический список

References

1. *Галка В.Л.* Вопросы электростатической искробезопасности наливных судов. СПб.: Элмор, 2003. [*V. Galka.* Issues of electrostatic spark safety on tankers. SPb.: Elmog, 2003. (In Russian)].
2. Исследование электризации светлых нефтепродуктов и разработка рекомендации для проектирования и безопасной эксплуатации эстакад и резервуаров. Отчетные материалы. М.: МЭИ, 1983. [Study on electrostatic charging of light oil products and recommendation for design and safe service of loading racks and tanks. М.: МЭИ, 1983. (In Russian)].
3. *Потехин В.М.* Основы теории химических процессов технологии органических веществ и нефтепереработки. СПб: Химиздат, 2007. [*V. Potekhin.* Fundamentals of chemical processes in organic material processing and oil refining technologies. SPb.: Khimizdat, 2007. (In Russian)].

4. *Максимов Б.К., Обух А.А., Тихонов А.В.* Электростатическая безопасность при заполнении резервуаров нефтепродуктами. М.: Энергоатомиздат, 1989. [*B. Maksimov, A. Obukh, A. Tikhonov.* Electrostatic safety during filling of tanks with oil products. Energoizdat, 1989. (In Russian)].

Сведения об авторах

Ильин Артем Александрович, инженер филиала «ЦНИИ СЭТ» ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196128, Санкт-Петербург, ул. Благодатная, д. 6. Тел.: +7 (999) 216-89-58; E-mail: artem.ilin1994@gmail.com.

Джиоева Тэона Батуровна, специалист филиала «ЦНИИ СЭТ» ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196128, Санкт-Петербург, ул. Благодатная, д. 6. Тел.: +7 (911) 136-12-35; E-mail: teonaamina@mail.ru.

About the authors

Ilin A., Engineer of TSNII SET, affiliated branch of Krylov State Research Centre. Address: Ul. Blagodatnaya 6, St. Petersburg 196128, Russia. Tel.: +7 (999) 216-89-58; E-mail: artem.ilin1994@gmail.com.

Dzhioeva T., Specialist of TSNII SET, affiliated branch of Krylov State Research Centre. Address: Ul. Blagodatnaya 6, St. Petersburg 196128, Russia. Tel.: +7 (911) 136-12-35; E-mail: teonaamina@mail.ru.

Поступила / Received: 01.03.18
Принята в печать / Accepted: 18.04.18
© Ильин А.А., Джиоева Т.Б., 2018