

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ КАБЕЛЬНОЙ ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ С ИЗОЛЯЦИЕЙ ИЗ СШИТОГО ПОЛИЭТИЛЕНА ПРИ ПОДЗЕМНОЙ ПРОКЛАДКЕ

В настоящей статье рассматривается математическое моделирование стационарного теплового поля в сечении одножильного кабеля с изоляцией из сшитого полиэтилена. Для моделирования составлена схема замещения тепловых процессов, выполненная с помощью метода однородных тел. Схема замещения учитывает диэлектрические потери, температуру окружающей среды, а также температурную зависимость активного сопротивления жилы кабеля. Оценка адекватности разработанной математической модели выполнена путем сравнения полученных результатов с результатами расчета тепловых и электрических процессов методом конечных элементов с помощью программного обеспечения «ANSYS Workbench». Полученная математическая модель может быть использована для контроля пропускной способности кабельных линий с изоляцией из сшитого полиэтилена и ограничения их срока службы из-за температурного старения изоляции.

**Ключевые слова:** кабель с изоляцией из сшитого полиэтилена, тепловая схема замещения, тепловое сопротивление.

**Введение.** Для распределения и передачи электрической энергии используются кабельные линии среднего напряжения, проложенные непосредственно в грунте. Широкое применение находят одножильные кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена. С ростом городов и промышленных предприятий происходит увеличение потребляемой мощности, в связи с чем актуальным становится вопрос анализа пропускной способности кабельных линий. Пропускная способность линий электропередачи зависит от температуры проводника [1–5]. На температуру значительное влияние оказывает процесс рассеивания тепла от кабеля в окружающую среду. Особенности тепловых процессов играют важную роль в оценке рационального использования кабельных систем [6, 7]. Различные аспекты исследования силовых кабелей с учётом тепловых процессов представлены в работах [8–16].

Широкой популярностью пользуется подход определения температуры элементов кабеля с помощью численного метода — метода конечных элементов. Однако требуемые значительные вычислительные ресурсы ЭВМ, сложности подготовки исходных данных и анализа результатов расчета в ряде случаев ограничивают применение этого подхода. Ниже предлагается выполнять определение температуры кабеля на основе тепловой схемы замещения. К достоинствам такой модели следу-

ет отнести учет температуры окружающей среды и потерь в элементах кабеля, а также возможность определения влияния на протекающие процессы соседних кабелей.

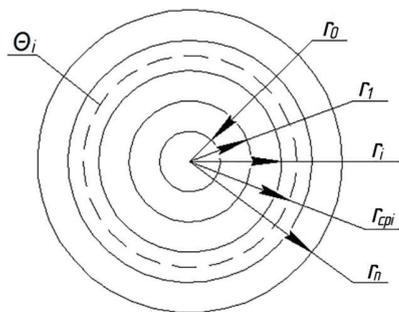
**Математическая модель кабельной линии электропередачи с изоляцией из сшитого полиэтилена.** Для формирования математической модели КЛЭП с изоляцией из СПЭ представим кабель в соответствии с рис. 1.

Для составления расчётной схемы одножильного кабеля представим каждый слой в виде теплового. Математическая модель кабельной линии с изоляцией из сшитого полиэтилена формируется для поперечного сечения кабеля, представленного на рис. 1.

Для составления расчётной схемы одножильного кабеля каждый слой (рис. 2) сечения кабеля ( $r_1 - r_n$ ) представляется в виде теплового сопротивления ( $R_{m1} - R_{mn}$ ), зависящего от материала и толщины слоя. Схема замещения кабеля в общем виде представлена на рис. 3, где  $P_0 - P_n$  — тепловыделения жилы и слоёв, являющиеся аналогами источников тока;  $\Theta_0$  — температура границы раздела сред воздух — земля, являющаяся аналогом источника ЭДС.

При составлении схемы замещения приняты следующие допущения:

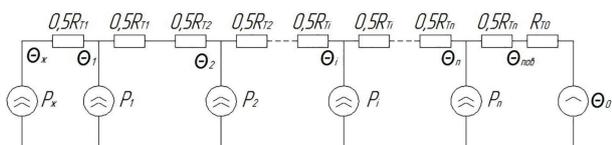
— кабель имеет идеальную цилиндрическую форму;



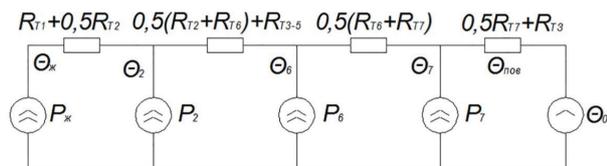
**Рис. 1.** Схема разделения кабеля на ряд колец для численного расчета температуры:  $r_0-r_n$  — внешние радиусы слоёв кабеля,  $\theta_i$  — температура средней линии  $i$ -го слоя кабеля, т. е. температура  $i$ -го слоя на радиусе  $r_{cpi} = r_1 + 0,5 \cdot (r_{i+1} - r_1)$ , °C



**Рис. 2.** Строение кабеля АПВП: 0 — алюминиевая жила; 1 — экран по жиле; 2 — изоляция; 3 — экран по изоляции; 4, 6 — кабельная бумага; 5 — медный экран; 7 — оболочка кабеля



**Рис. 3.** Схема замещения тепловой цепи для численного расчета температуры



**Рис. 4.** Схема замещения для одиночного кабеля АПВП без заземления экранов

— параметры кабеля и окружающей его среды не меняются вдоль оси.

Представляется, что при данных допущениях, тепло будет равномерно распространяться от оси кабеля до его поверхности, а от поверхности рассеиваться в окружающую среду. В процессе теплопередачи в сечении кабеля будут образовываться изотермы, представляющие собой концентрические окружности.

Каждому однородному слою  $i$  (рис. 1) соответствует значение температуры  $\theta_i$  его средней линии. Температуру  $\theta_0$  будем считать заранее заданной (полученной в ходе измерений).

Температура  $\theta_{нов}$  соответствует температуре поверхности кабеля.

Тепловое сопротивление каждого слоя и тепловое сопротивление земли определяются согласно следующим выражениям [17]:

$$R_T = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{1}{L \cdot \lambda} \cdot \ln\left(\frac{r_{внеш}}{r_{внутр}}\right), \quad (1)$$

$$R_{T3} = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{1}{\lambda_3} \cdot \ln\left(\frac{h}{R_{нар}} + \sqrt{\left(\frac{h}{R_{нар}}\right)^2 - 1}\right), \quad (2)$$

где  $R_T$  — тепловое сопротивление слоя, °C/Вт;  $\lambda$  — удельная тепловая проводимость среды, Вт/(м·°C);  $L$  — длина участка кабеля, м;  $r_{внеш}$  — внешний радиус слоя, мм;  $r_{внутр}$  — внутренний радиус слоя, мм;  $R_{T3}$  — тепловое сопротивление земли, °C/Вт;  $\lambda_3$  — удельная тепловая проводимость земли, Вт/(м·°C);  $R_{нар}$  — наружный радиус кабеля, мм;  $h$  — глубина прокладки кабеля, мм.

При определении мощности, выделяемой в жиле кабеля, а также в экранирующем слое учитывается, что сопротивление проводника с учётом нагрева представляется уравнением:

$$R_t = R_{20} \cdot [1 + \alpha(t - 20)], \quad (3)$$

где  $R_t$  — сопротивление проводника при температуре  $t$  °C, Ом;  $R_{20}$  — сопротивление проводника при температуре 20 °C,  $\alpha$  — температурный коэффициент, 1/°C.

В кабелях высокого напряжения выделение теплоты в изоляции за счет диэлектрических потерь весьма существенно. Если принять допущение, что тангенс диэлектрических потерь и диэлектрическая проницаемость не зависят от радиуса, то вычислить потери мощности в изоляции можно по выражению [17, 18].

$$P_{из} = U^2 \cdot \omega \cdot C \cdot \operatorname{tg}\delta, \quad (4)$$

где  $P_{из}$  — диэлектрические потери мощности, Вт;  $U$  — напряжение, прилагаемое к изоляции, В;  $\omega$  — угловая частота сигнала, с<sup>-1</sup>;  $C$  — ёмкость одножильного кабеля, Ф;  $\operatorname{tg}\delta$  — тангенс диэлектрических потерь.

Для ёмкости одножильного кабеля рекомендуется уравнение [17, 18].

$$C = \frac{2\pi \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot L}{\ln \frac{R}{r_0}}, \quad (5)$$

где  $\varepsilon$  — диэлектрическая проницаемость изоляции кабеля;  $\varepsilon_0 \cong 8,85 \cdot 10^{-12}$  Ф/м — электрическая постоянная;  $R$  — наружный радиус кабеля, мм;  $r_0$  — радиус жилы кабеля, мм.

Составим систему уравнений для нахождения температуры кабельной линии без заземления экранов, схема замещения для кабеля марки АПВП 1×50/16 — 10кВ (рис. 2) представлена на рис. 4.

Математическое моделирование производится при следующих условиях:

- температура окружающей среды  $\theta_0 = 20$  °C;
- ток в кабелях равен  $I = 150$  А.

Геометрические и тепловые параметры кабеля АПВП представлены в табл. 1. Значения тепловых сопротивлений каждого слоя, полученные по формуле (1), представлены в табл. 2.

В табл. 3, 4 представлены соответственно диэлектрическая проницаемость и тангенс диэлектри-

Параметры слоёв и окружающей кабель среды (грунта)

№ слоя	Наименование слоя	1/λ, °С·м/Вт	Внешний радиус слоя r <sub>i</sub> , мм
0	Токопроводящая жила (алюминий)		3,95
1	Экран по жиле	3,5	4,55
2	Изоляция	3,5	7,95
3	Экран по изоляции	3,5	8,55
4	Электропроводящая бумага	6	8,75
5,1	Повив из медных проволок	2,7·10 <sup>-3</sup>	10,75
5,2	Медная лента	2,7·10 <sup>-3</sup>	10,85
6	Кабельная бумага	6	10,98
7	Оболочка из полиэтилена	3,5	12,75
Земля		1,2	h = 700 мм R <sub>нар</sub> = 12,75 мм

Таблица 2

Тепловые сопротивления слоев кабеля

Слой	R <sub>ит</sub> , °С/Вт
Экран по жиле	0,0788
Изоляция	0,3109
Экран по изоляции	0,0405
Электропроводящая бумага	0,0221
Медный экран	9,2437·10 <sup>-5</sup>
Кабельная бумага	0,0131
Оболочка из полиэтилена	0,0822
Грунт	0,8974

Таблица 3

Параметры диэлектриков [10]

№ слоя	Материал слоя	ε	tgδ
2, 7	Полиэтилен	2,25	3,5·10 <sup>-4</sup>
6	Кабельная бумага	3	23·10 <sup>-4</sup>

Таблица 4

Диэлектрические потери кабеля

Слой	P <sub>и</sub> , Вт
Изоляция	7,0075·10 <sup>-4</sup>
Кабельная бумага	8,9904·10 <sup>-3</sup>
Оболочка из полиэтилена	1,174·10 <sup>-3</sup>

Значения температур для одиночного кабеля

Слой	Жила	2	7	8	Поверхность
Θ, °С	39,8133	36,6033	33,5241	32,8707	32,3071

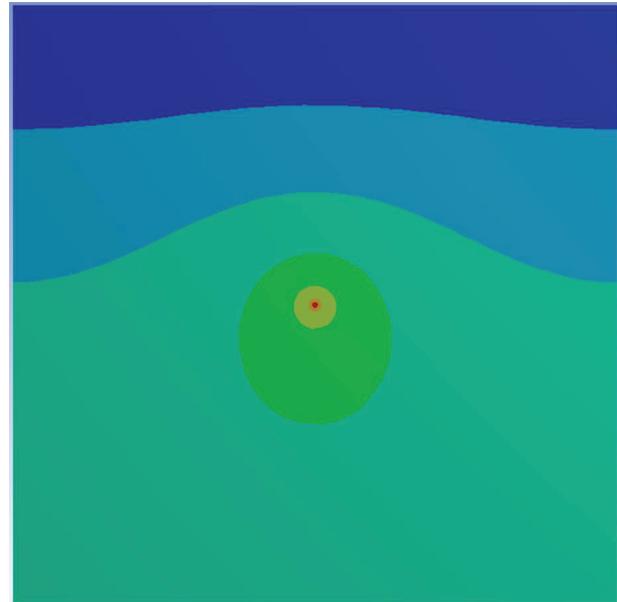


Рис. 5. Картина распределения температуры, полученная в программном обеспечении «ANSYS Workbench»

ческих потерь для слоев 2, 6, 7, а также расчетные значения диэлектрических потерь.

Для составления системы уравнений, описывающих тепловые процессы в кабеле, воспользуемся методом узловых потенциалов. В соответствии с рис. 4 система уравнений для расчета температуры кабеля примет вид

$$\begin{cases} \frac{\Theta_{ж} - \Theta_2}{R_{T1} + 0,5R_{T2}} - P_0 = 0 \\ \frac{\Theta_2 - \Theta_{ж}}{R_{T1} + 0,5R_{T2}} + \frac{\Theta_2 - \Theta_6}{0,5(R_{T2} + R_{T6}) + R_{T3} + R_{T4} + R_{T5}} - P_2 = 0 \\ \frac{\Theta_6 - \Theta_2}{0,5(R_{T2} + R_{T6}) + R_{T3} + R_{T4} + R_{T5}} + 2 \frac{\Theta_6 - \Theta_7}{R_{T6} + R_{T7}} - P_6 = 0 \\ 2 \frac{\Theta_7 - \Theta_6}{R_{T6} + R_{T7}} + \frac{\Theta_7 - \Theta_{окр}}{0,5R_{T7} + R_{T3}} - P_7 = 0 \end{cases} \quad (6)$$

где  $P_0 = I^2 \cdot \frac{\rho_{Al}}{F_{ж}} [1 + \alpha_{Al}(\Theta_{ж} - 20)]$  — тепловыделение жилы кабеля;  $\rho_{Al}$  — удельное сопротивление постоянному току алюминия, Ом·м;  $F_{ж}$  — площадь поперечного сечения жилы, мм<sup>2</sup>;  $\alpha_{Al}$  — температурный коэффициент алюминия, 1/°С.

В табл. 5 представлены результаты расчета температуры для одиночного кабеля.

**Подтверждение адекватности математической модели одиночного кабеля с изоляцией из сшитого полиэтилена.** Для подтверждения адекватности разработанной математической модели была произведена её верификация с помощью численного моделирования в программном обеспечении «ANSYS Workbench».

Авторами было смоделировано распределение температуры в радиальном направлении от центра кабеля к его поверхности, далее в прилежа-

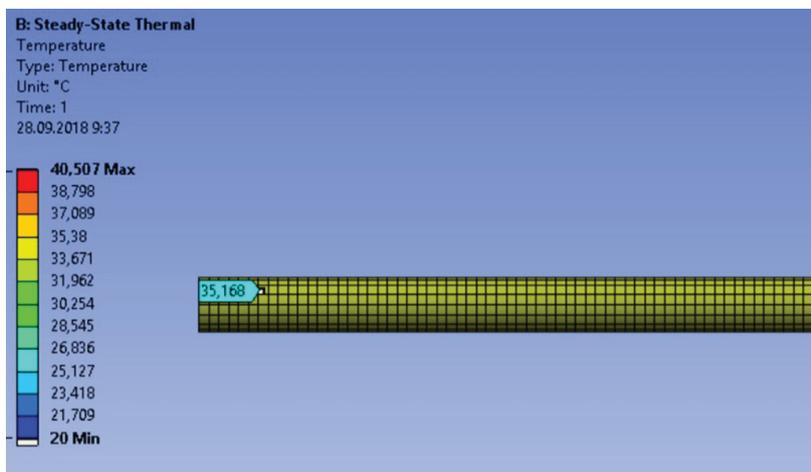


Рис. 6. Температура на поверхности кабеля

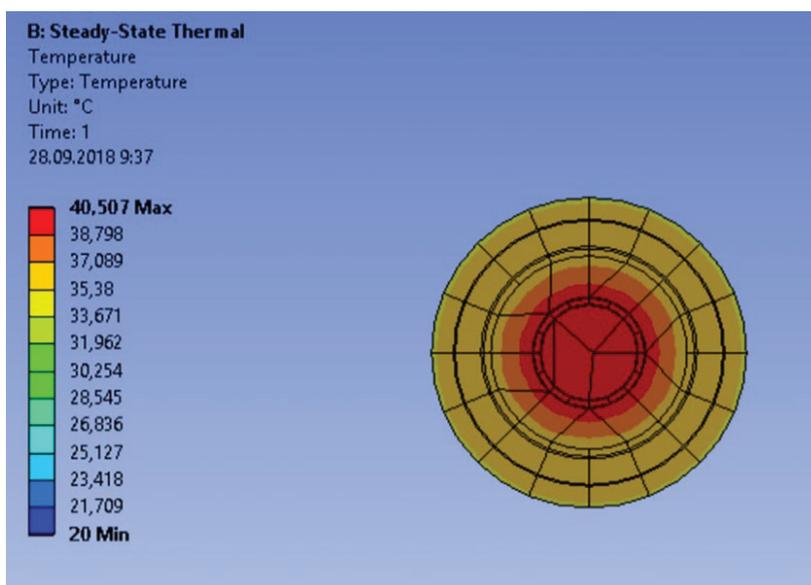


Рис. 7. Распределение температур в слоях кабеля

щий грунт. Для учета температурной зависимости активного сопротивления кабеля необходимо воспользоваться модулем «Electric» для задания электрических параметров кабеля, а также модулем «Steady-State Thermal» для учета распределения температуры по сечению кабеля и грунта.

Картина распределения температуры, полученная в ходе моделирования, представлена на рис. 5.

**Результаты и обсуждения.** Нагрев жилы кабеля составил 40,507 °C (рис. 6, 7), расходится со значением, полученным на основе созданной математической модели, менее чем на 1 °C (39,813 °C). Полученные расхождения можно объяснить более точным определением диэлектрических потерь, вихревых токов в экране при использовании метода конечных элементов.

Разработанная математическая модель кабеля из сшитого полиэтилена позволяет рассчитать температуру средней линии каждого слоя, из которого состоит кабель.

Указанная модель может быть положена в основу моделирования кабельной системы из трех параллельных кабелей, когда необходимо учитывать влияние кабелей друг на друга. Данное влияние проявляется не только в виде дополнительно-го нагрева со стороны соседних кабелей, но также

проявляется в виде изменения индуктивных сопротивлений токопроводящих материалов.

#### Библиографический список

1. Гиршин С. С., Бубенчиков А. А., Петрова Е. В., Горюнов В. Н. Математическая модель расчета потерь мощности в изолированных проводах с учетом температуры // Омский научный вестник. 2009. № 3 (83). С. 176 – 179.
2. Горюнов В. Н., Осипов Д. С., Лютаревич А. Г. Определение управляющего воздействия активного фильтра гармоник // Электро. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. 2009. № 6. С. 20 – 24.
3. Бигун А. Я., Гиршин С. С., Петрова Е. В., Горюнов В. Н. Учет температуры проводов повышенной пропускной способности при выборе мероприятий по снижению потерь энергии на примере компенсации реактивной мощности // Современные проблемы науки и образования. 2015. № 1-1. С. 212.
4. Горюнов В. Н., Гиршин С. С., Кузнецов Е. А., Петрова Е. В. Анализ погрешностей расчета температуры и потерь мощности по базовому и приближенному уравнениям теплового баланса воздушных линий электропередач // Современные проблемы науки и образования. 2015. № 1-1. С. 210.
5. Goryunov V. N., Girshin S. S., Kuznetsov E. A. [et al.] A mathematical model of steady-state thermal regime of insulated overhead line conductors // 2016 IEEE 16th International

Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC 2016). 7555481. 2016. P. 329–334.

6. Lobão J. A., Devezas T., Catalão J. P. S. Reduction of greenhouse gas emissions resulting from decreased losses in the conductors of an electrical installation // *Energy Convers Manage.* 2014. Vol. 87. P. 787–95. DOI: 10.1016/j.enconman.2014.07.067.

7. Tian Q, Lin X. Winding capacitance dividing scheme for a high-voltage cable-wound generator // *Energy Convers Manage.* 2010. Vol. 51. P. 428–33. DOI: 10.1016/j.enconman.2009.10.004.

8. Hwang C. C., Jiang Y. H. Extensions to the finite element method for thermal analysis of underground cable systems // *Electric Power Systems Research.* 2003. Vol. 64 (2). P. 159–164. DOI: 10.1016/S0378-7796(02)00192-X.

9. Al-Saud M. S., El-Kady M. A., Findlay R. D. A new approach to underground cable performance assessment // *Electric Power Systems Research.* 2008. Vol. 78 (5). P. 907–18. DOI: 10.1016/j.epr.2007.06.010.

10. De Lieto V. R., Fontana L., Vallati A. Thermal analysis of underground electrical power cables buried in nonhomogeneous soils // *Applied Thermal Engineering.* 2011. Vol. 31. P. 772–778.

11. De Lieto V. R., Fontana L., Vallati A. Experimental study of the thermal field deriving from an underground electrical power cable buried in nonhomogeneous soils // *Applied Thermal Engineering.* 2014. Vol. 62 (2). P. 390–397. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2013.09.002.

12. Papagiannopoulos I., Chatziathanasiou V., Exizidis L. [et al.]. Behaviour of the thermal impedance of buried power cables // *International Journal of Electrical Power & Energy Systems.* 2013. Vol. 44 (1). P. 383–387. DOI: 10.1016/j.ijepes.2012.07.064.

13. Chatziathanasiou V., Chatzipanagiotou P., Papagiannopoulos I. [et al.]. Dynamic thermal analysis of underground medium power cables using thermal impedance, time constant distribution and structure function // *Applied Thermal Engineering.* 2013. Vol. 60. P. 256–260.

14. Wiecek B., De Mey G., Chatziathanasiou V. [et al.]. Harmonic analysis of dynamic thermal problems in high voltage overhead transmission lines and buried cables // *International Journal of Electrical Power & Energy Systems.* 2014. Vol. 58. P. 199–205.

15. Лебедев В. Д., Зайцев Е. С. Расчет температуры жилы однофазного высоковольтного кабеля с изоляцией из сшитого полиэтилена в режиме реального времени // *Вестник ИГЭУ.* 2015. № 4. С. 11–16.

16. Лебедев В. Д., Зайцев Е. С. Алгоритм оценки температуры жил трёхфазных высоковольтных кабельных линий с изоляцией из сшитого полиэтилена // *Электрические станции.* 2016. № 9 (1022). С. 34–38.

17. Леонов В. М., Пешков И. Б., Рязанов И. Б. Основы кабельной техники: учебник для студентов высших учебных заведений / под ред. И. Б. Пешкова. М.: Издат. центр Академия, 2006. 432 с.

18. Shchebeniuk L. A., Antonets T. Yu. Investigation of losses in insulation of high-voltage cables with XLPE insulation // *Electrical Engineering & Electromechanics.* 2016. No. 4. P. 58–62. DOI: 10.20998/2074-272X.2016.4.08.

**ТКАЧЕНКО Всеволод Андреевич**, магистрант гр. ЭЭМ-171 факультета элитного образования и магистратуры, инженер кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий».

SPIN-код: 5200-0062

AuthorID (РИНЦ): 939477

**КРОПОТИН Олег Витальевич**, доктор технических наук, доцент (Россия), декан факультета довузовской подготовки, помощник проректора по учебной работе по профориентации.

SPIN-код: 4218-4900

AuthorID (РИНЦ): 118225

ORCID: 0000-0002-6620-9945

AuthorID (SCOPUS): 6505835545

ResearcherID: H-4616-2013

**ШЕПЕЛЕВ Александр Олегович**, аспирант, ассистент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий».

SPIN-код: 8418-9944, AuthorID (РИНЦ): 827023

**КРОПОТИН Владимир Олегович**, магистрант гр. ЭЭМ-181 факультета элитного образования и магистратуры.

Адрес для переписки: alexshepelev93@gmail.com

#### Для цитирования

Ткаченко В. А., Кропотин О. В., Шепелев А. О., Кропотин В. О. Математическая модель кабельной линии электропередачи с изоляцией из сшитого полиэтилена при подземной прокладке // *Омский научный вестник.* 2018. № 6 (162). С. 137–141. DOI: 10.25206/1813-8225-2018-162-137-141.

Статья поступила в редакцию 05.10.2018 г.

© В. А. Ткаченко, О. В. Кропотин, А. О. Шепелев, В. О. Кропотин