

ВЛИЯНИЕ ФОРМЫ ФЕРРОМАГНИТНОГО ЭКРАНА НА СТЕПЕНЬ СНИЖЕНИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ СВЕРХВЫСОКОВОЛЬТНОЙ КАБЕЛЬНОЙ ЛИНИИ

И.Н. Кучерявая, докт. техн. наук
Институт электродинамики НАН Украины,
пр. Победы, 56, Киев-57, 03057, Украина,
email: rB.irinan@gmail.com

Исследовано магнитное поле подземной одноцепной кабельной линии на напряжении 330 кВ с использованием ферромагнитного экрана различной конфигурации – от плоского и закругленного на концах экрана до круглого, охватывающего кабельную линию. Изучены особенности распределения магнитного поля кабельной линии вблизи нее и экрана, а также поля на поверхности земли. Как показали результаты компьютерных расчетов, наиболее эффективное экранирование обеспечивает применение замкнутого круглого ферромагнитного экрана. Библ. 8, рис. 6.

Ключевые слова: подземная кабельная линия, сверхвысоковольтные силовые кабели, экранирование магнитного поля, ферромагнитный экран, экологическая безопасность, компьютерное моделирование.

Распространенным способом снижения магнитного поля кабельных линий является использование электромагнитных и магнитных экранов [1, 2]. В отдельных случаях используются также ферромагнитные экраны [3], обладающие как магнитными, так и проводящими свойствами.

Экранирование кабельных линий осуществляется, прежде всего, с целью решения экологических проблем, в частности, для обеспечения допустимого уровня магнитного поля на участках кабельной трассы, проходящих вблизи густонаселенных районов и мест массового пребывания людей (аэропортов, вокзалов, административных зданий, общественных учреждений и др.).

В литературе, например в [1, 3, 4], рассматриваются как плоские, так и замкнутые экраны подземных силовых кабельных линий. Конструктивное исполнение экранов кабельных линий в общем случае влияет не только на уровень снижения создаваемого ими магнитного поля, но и на температуру нагрева металлических элементов кабелей, а значит, на пропускную способность кабельной линии.

Целью работы является исследование эффективности экранирования магнитного поля сверхвысоковольтной кабельной линии с применением ферромагнитного экрана различной геометрической конфигурации – от плоского экрана до замкнутого круглого, охватывающего кабельную линию. Изучение проводится путем компьютерного моделирования методом конечных элементов, реализуемого в программе Comsol [5].

Рассматривается подземная кабельная линия, состоящая из трех однофазных кабелей, расположенных треугольником вплотную друг к другу (рис. 1), и экран, изготовленный из ферромагнитного горячекатанного низкоуглеродистого материала Magnetil (электростали) с заданными свойствами [3]. Для оценки эффективности экранирования проводится сравнение различных конфигураций ферромагнитного экрана по отношению к уровню магнитного поля на поверхности земли над кабельной линией в соответствии с принятыми в Украине санитарными нормами – не более 0,5 мкТл для магнитного поля частотой 50 Гц [6].

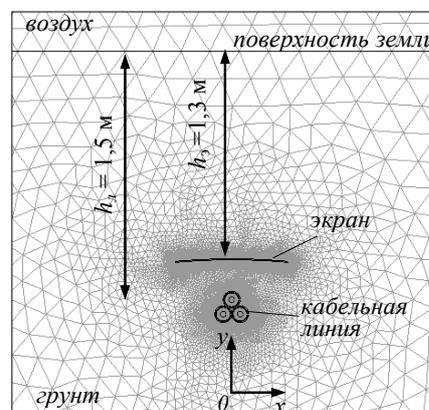


Рис. 1

Математическая модель для исследования. Моделирование магнитного поля кабельной линии выполняется для стационарного режима в двумерном случае в предположениях, что кабельная линия является протяженной и проложенной параллельно поверхности земли на заданной глубине; условия прокладки неизменны по всей трассе; металлические (медные) экраны силовых кабелей в кабельной линии заземлены с двух концов. Задача расчета магнитного поля формулируется в декартовой системе координат в плоскости xOy (рис. 1) относительно комплексного векторного магнитного потенциала $\dot{\mathbf{A}} = (0, 0, \dot{A}_z)$, имеющего единственную z -составляющую $\dot{A}_z(x, y)$.

Модель для расчета магнитного поля основывается на следующей системе интегро-дифференциальных уравнений:

- для области жил трех кабелей:

$$j\omega\sigma_i \dot{\mathbf{A}} + \nabla \times (\mu_0^{-1} \nabla \times \dot{\mathbf{A}}) = \sigma_i \Delta \dot{U}_i, \quad i = 1, 2, 3, \quad (1)$$

$$\int_{S_i} \dot{J}_z dS = \int_{S_i} (-j\omega\sigma_i \dot{A}_z + \sigma_i \Delta \dot{U}_i) dS = \dot{I}_i; \quad (2)$$

- для области металлических экранов трех кабелей:

$$j\omega\sigma_i \dot{\mathbf{A}} + \nabla \times (\mu_0^{-1} \nabla \times \dot{\mathbf{A}}) = 0; \quad i = 1, 2, 3, \quad (3)$$

$$\int_{S_i} \dot{J}_z dS = \int_{S_i} -j\omega\sigma_i \dot{A}_z dS = 0; \quad (4)$$

- для области ферромагнитного экрана:

$$j\omega\sigma_3 \dot{\mathbf{A}} + \nabla \times (\mu_0^{-1} \mu_r^{-1} \nabla \times \dot{\mathbf{A}}) = \sigma_3 \Delta \dot{U}_3; \quad (5)$$

$$\int_{S_3} \dot{J}_z dS = \int_{S_3} (-j\omega\sigma_3 \dot{A}_z + \sigma_3 \Delta \dot{U}_3) dS = 0; \quad (6)$$

- для области грунта:

$$j\omega\sigma_{zp} \dot{\mathbf{A}} + \nabla \times (\mu_0^{-1} \nabla \times \dot{\mathbf{A}}) = 0; \quad (7)$$

- для области воздуха:

$$\nabla \times (\mu_0^{-1} \nabla \times \dot{\mathbf{A}}) = 0, \quad (8)$$

где $\omega = 2\pi f$ – угловая частота тока; j – мнимая единица; σ_i – электропроводность i -й проводящей среды (трех жил, трех экранов кабелей в кабельной линии, грунта и ферромагнитного экрана) в рамках расчетной области (рис. 1); μ_0 и μ_r – магнитная постоянная и относительная магнитная проницаемость экрана соответственно; \dot{J}_z – z -составляющая плотности тока; S_i – площадь поперечного сечения i -й проводящей среды; \dot{I}_i – комплексная величина тока в жиле i -го кабеля (полагается известной и равной току кабеля в номинальном режиме); $\Delta \dot{U}_i$ – падение напряжения в проводящей среде на участке единичной длины. В области экранов значение $\Delta \dot{U}_i = 0$ (рассматривается случай заземления экранов с двух концов), а падения напряжения на жилах одинаковы и смещены по фазе на 120° : $\Delta \dot{U}_i = \Delta \dot{U}_{жс} e^{j\theta}$, $\Delta \dot{U}_i = \Delta \dot{U}_{жс} e^{j2\pi/3}$, $\Delta \dot{U}_i = \Delta \dot{U}_{жс} e^{j4\pi/3}$ – соответственно на жилах фаз A, B, C . В этих выражениях $\Delta \dot{U}_{жс}$ задается из условия равенства токов в жилах номинальному значению.

В качестве граничных условий на всех внешних границах расчетной области выбирается условие магнитной изоляции:

$$\dot{A}_z = 0 \quad (9)$$

Более полно модель описана в работах [4, 7].

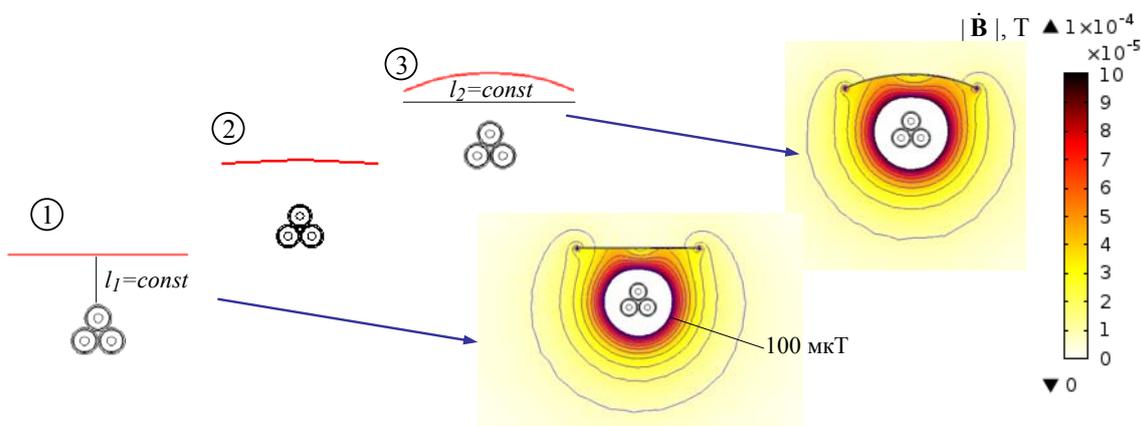


Рис. 2

Результаты компьютерного моделирования. С помощью модели (1) – (9) рассчитывалась подземная кабельная линия (рис. 1) на напряжение 330 кВ с полиэтиленовой изоляцией толщиной 23,5 мм, алюминиевой жилой сечением 800 мм², медным экраном сечением 150 мм². Номинальный ток кабельной линии полагался равным 630 А. Характеристики кабелей задавались в соответствии с данными, приведенными в статье [8]. Последовательность фаз кабелей – ABC.

Используемые в расчетах электрофизические свойства ферромагнитного экрана следующие: электропроводность $\sigma = 9,1 \cdot 10^6$ См/м, магнитная проницаемость $\mu_r = 3000$ [4], толщина экрана – 3 мм. Отметим, что при изменении геометрии экрана толщина его не изменялась. Кроме того, расстояние от кабельной линии до центра экрана соблюдалось неизменным ($l_1 = const$, рис. 2), как и в общем случае, длина экрана по оси Ox ($l_2 = const$, рис. 2).

Фрагмент расчетной области с нанесенной сеткой разбиения на конечные элементы изображен на рис. 1.

Ряд рассмотренных вариантов ферромагнитного экрана кабельной линии показан на рис. 2 слева, где 1 – плоский экран; 2 – изогнутый на концах; 3 – закругленный. Проиллюстрированы также распределения магнитного поля $|\dot{\mathbf{B}}|$ (в оттенках цвета и изолиниями, начиная с линии, соответствующей 100 мкТ) вокруг кабельной линии и экрана вариантов 1 и 2 (картины поля справа). В области ферромагнитного экрана всех вариантов максимальное значение магнитной индукции $|\dot{\mathbf{B}}|$ имеет место на

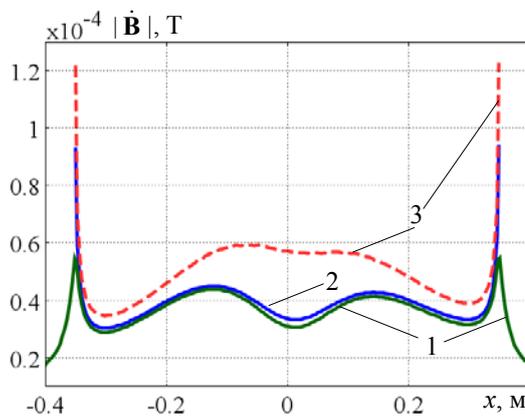


Рис. 3

концах экрана, что подтверждают и данные рис. 3, где в виде графиков отображено изменение $|\dot{\mathbf{B}}|$ вдоль отрезка, соединяющего концы экранов. Из рис. 3 видно, что плоский экран (вариант 1) характеризуется наименьшими значениями магнитной индукции.

На рис. 4, а показано распределение в оттенках цвета магнитной индукции $|\dot{\mathbf{B}}|$ выше поверхности земли при наличии закругленного ферромагнитного экрана (вариант 3). Здесь отмечены максимальное значение $|\dot{\mathbf{B}}|_{\max}$ над поверхностью земли и контурная линия, соответствующая значению 0,5 мкТ. Именно такое значение является гранично допустимым уровнем магнитного поля промышленной частоты в соответствии с установленными нормами [6]. Изменение магнитной индукции $|\dot{\mathbf{B}}|$ вдоль поверхности земли над кабелями для случаев использования закругленного экрана и без экрана показаны на рис. 4, б. Видно, что максимальное поле реализуется непосредственно над кабелями, а использование средств экра-

нирования позволяет снизить уровень магнитного поля на поверхности земли приблизительно в 1,52 раза. Площадь в поперечном сечении области, удовлетворяющей нормам безопасности (рис. 4), для закругленного экрана составляет $S = 0,81 \text{ м}^2$.

На рис. 5 показано распределение магнитной индукции $|\dot{\mathbf{B}}|$ вокруг кабельной линии в цвете и контурными линиями, начиная от изолинии, соответствующей 100 мкТ, для двух вариантов, показанных на вставках слева вверху: 4 – полукруглый экран (рис. 5, а); 5 – круглый замкнутый экран (рис. 5, б). Видно, что магнитное поле концентрируется на концах полукруглого экрана и слабо распространяется в направлении к поверхности земли (вдоль оси Oy). Замкнутый круглый экран (рис. 5, б) практически полностью обеспечивает экранирование магнитного поля кабельной линии.

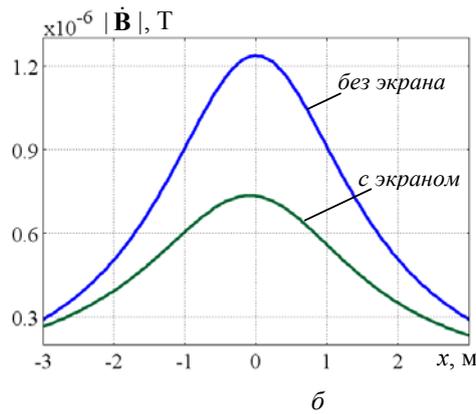
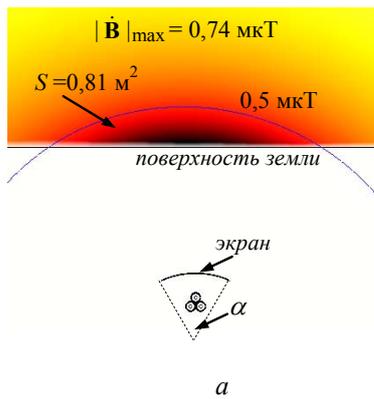


Рис. 4

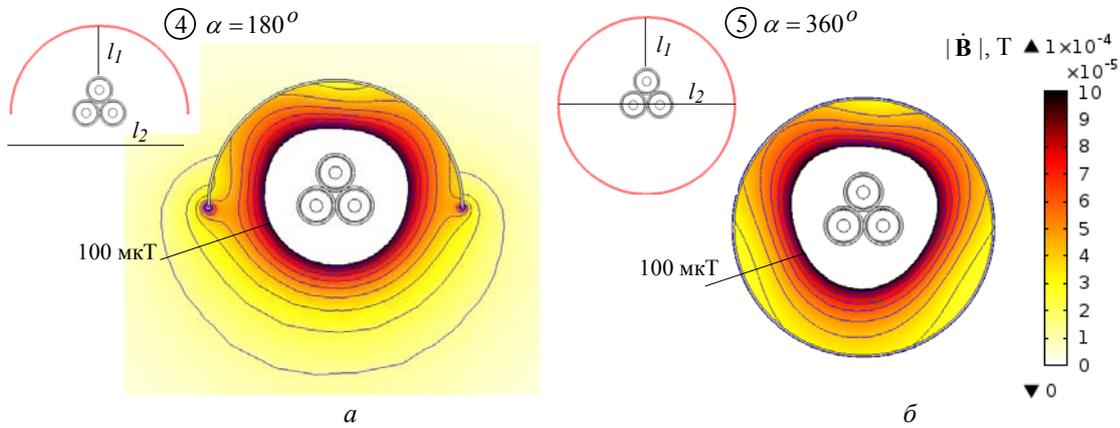


Рис. 5

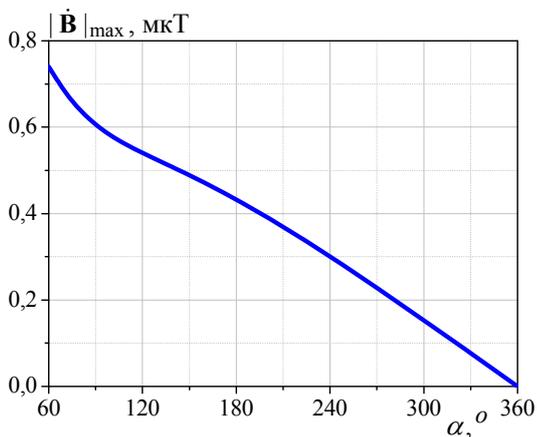


Рис. 6

Для пяти рассмотренных конфигураций ферромагнитного экрана площадь в поперечном сечении области, удовлетворяющей нормам безопасности (отмеченной на рис. 4), составляет без применения экранирующих средств $S = 2,9 \text{ м}^2$, а с использованием ферромагнитных экранов вариантов 1–5 соответственно $S = 0,92 \text{ м}^2$; $0,91 \text{ м}^2$; $0,81 \text{ м}^2$; $0,27 \text{ м}^2$; 0 м^2 . Согласно результатам компьютерных расчетов применение замкнутого экрана показывает наиболее эффективное экранирование магнитного поля кабельной линии.

В дополнение к приведенным расчетным данным на рис. 6 показано изменение максималь-

ного значения магнитной индукции $|\dot{\mathbf{B}}|_{\max}$ на поверхности земли над кабельной линией в зависимости от угла раскрытия ферромагнитного экрана α , указанного на рис. 4, а. Случай полукруглого экрана (рис. 5, а) соответствует значению $\alpha = 180^\circ$, а замкнутого экрана (рис. 5, б) – $\alpha = 360^\circ$.

Заключение. Проанализированы особенности распределения магнитного поля вблизи одноцепной подземной трехфазной кабельной линии на напряжении 330 кВ и ферромагнитного экрана, выполненного из материала Magnetil, в зависимости от его геометрической конфигурации – от плоского и закругленного на концах экрана до замкнутого круглого. Применение ферромагнитного экрана позволяет снизить уровень магнитного поля кабельной линии, по крайней мере, в ~1,5 раза. Наиболее эффективное экранирование с точки зрения безопасного уровня магнитного поля на поверхности земли над кабелями обеспечивает использование замкнутого круглого экрана, охватывающего кабельную линию. Для такого случая поле практически не распространяется за пределы экрана, и уровень поля на поверхности земли над линией полностью соответствует принятым санитарным нормам электромагнитной безопасности.

Использованный в работе подход к выбору наиболее эффективной конфигурации ферромагнитного экрана позволяет в дальнейшем для конкретных случаев кабельных линий (одно- и многоцепных линий различного напряжения и с различным расположением кабелей при использовании экранов, изготовленных из различных материалов) обеспечивать условия наиболее эффективного экранирования магнитного поля при минимизации размеров зон отчуждения в соответствии с экологическими стандартами.

Фінансується за держбюджетною темою «Розвинути теорію імпульсних і високочастотних перехідних електромагнітних процесів у енергетичних і технологічних резонансних установках та високовольтних кабельних лініях електропередачі» (шифр «ЕЛКАБ»), що виконується за Постановою Бюро ВФТПЕ 04.07.2017 р., протокол № 11. Державний реєстраційний номер роботи 0117U007713.

1. Грешняков Г.В., Доронин М.В., Коровкин Н.В. Комбинированные экраны для силовых кабельных линий. *Кабели и провода*. 2015. № 5 (254). С. 8 – 13.
2. Machado V.M. Magnetic field mitigation shielding of underground power cables. *IEEE Transactions on Magnetics*. 2012. Vol. 48. No 2. Pp. 707 – 710.
3. De Wulf M., Wouters P., Sergeant P., Dupré L., Hoferlin E., Jacobs S., Harlet P. Electromagnetic shielding of high-voltage cables. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2007. No. 316. Pp. 908 – 911. DOI: <https://10.1016/j.jmmm.2007.03.137>.
4. Кучерявая И.Н. Экранирование подземной кабельной линии сверхвысокого напряжения с помощью плоского ферромагнитного экрана. *Технічна електродинаміка*. 2019. № 6.
5. Comsol multiphysics modeling and simulation software. URL: <http://www.comsol.com/>. (accessed: 24.04.2019).
6. Правила улаштування електроустановок. Мінпаливенерго України, 2010. 776 с.
7. Кучерявая И.Н. Магнитное поле сверхвысоковольтной двухцепной кабельной линии с изоляцией из сшитого полиэтилена. *Праці Ін-ту електродинаміки НАН України*. 2019. Вип. 51. С. 13 – 17.
8. Лях В.В., Молчанов В.М., Сантацкий В.Г., Квицинский А.А. Кабельная линия напряжением 330 кВ: некоторые аспекты проектирования. *Промелектро*. 2009. № 6. С. 27 – 33.

УДК 621.315.23 : 004.94

ВІПЛИВ ФОРМИ ФЕРРОМАГНІТНОГО ЕКРАНА НА СТУПІНЬ ЗНИЖЕННЯ МАГНІТНОГО ПОЛЯ НАДВИСОКОВОЛЬТНОЇ КАБЕЛЬНОЇ ЛІНІЇ

І.М. Кучерява, докт. техн. наук
Інститут електродинаміки НАН України,
пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03057, Україна,
rB.irinan@gmail.com

Досліджено магнітне поле підземної одноланцюгової кабельної лінії на напругу 330 кВ з використанням феромагнітного екрана різної конфігурації – від плоского й закругленого на кінцях екрана до круглого, що охоплює кабельну лінію. Вивчено особливості розподілу магнітного поля кабельної лінії поблизу неї та екрана, а також поля на поверхні землі. Як показали результати комп'ютерних розрахунків, найбільш ефективне екранування забезпечує застосування замкнутого круглого феромагнітного екрана. Бібл. 8, рис.6.

Ключові слова: підземна кабельна лінія, надвисоковольтні силові кабелі, екранування магнітного поля, феромагнітний екран, екологічна безпека, комп'ютерне моделювання.

INFLUENCE OF FERROMAGNETIC SHIELD SHAPE ON MITIGATION OF MAGNETIC FIELD GENERATED BY EXTRA-HIGH VOLTAGE CABLE LINE

I.M. Kucheriava

Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine,
pr. Peremohy, 56, Kyiv-57, 03057, Ukraine,
rB.irinan@gmail.com

The magnetic field of underground single-circuit 330 kV cable line with ferromagnetic shield of various configurations – from plane shield and shield rounded at its ends to closed round shield covering the cable line is studied. The features of magnetic field distribution near the cable line and its shield as well as on the top of the ground are analyzed. As shown by computations, the most effective shielding is provided with closed round ferromagnetic shield. References 8, figures 6.

Key words: underground cable line, extra-high voltage (EHV) power cables, shielding of cables, ferromagnetic shield, ecological safety, computer modeling.

1. Greshniakov G.V., Doronin M.V., Korovkin N.V. Combined magnetic shields for cable power lines. *Kabeli i provoda*. 2015. No 5. P. 8 – 13. (Rus).
2. Machado V.M. Magnetic field mitigation shielding of underground power cables. *IEEE Transactions on Magnetics*. 2012. Vol. 48. No 2. Pp. 707 – 710.
3. De Wulf M., Wouters P., Sergeant P., Dupré L., Hoferlin E., Jacobs S., Harlet P. Electromagnetic shielding of high-voltage cables. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2007. No 316. Pp. 908 – 911.
DOI: <https://10.1016/j.jmmm.2007.03.137>.
4. Kucheriava I.M. Shielding of underground extra-high voltage cable line by plane ferromagnetic shield. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2019. No 6. (Rus).
5. Comsol multiphysics modeling and simulation software. URL: <http://www.comsol.com/>.(accessed: 24.04.2019).
6. Electric installation code. Minpalivo Ukrainy, 2010. 776 p. (Ukr).
7. Kucheriava I.N. Magnetic field of extra-high voltage two-circuit cable line with XLPE insulation. *Pratsi Instytutu Elektrodynamiki NAN Ukrainy*. 2019. No 52. Pp. 13 – 17. (Rus).
8. Liach V.V., Molchanov V.M., Santatskii V.G., Kvitsinskyi A.A. 330 kV cable line: some aspects of designing. *Pro-melektro*. 2009. No 6. Pp. 27 – 33. (Rus).

Надійшла 20.03. 2019
Received 20.03. 2019