

DOI: 10.34031/2618-7183-2019-2-1-11-16

*Бондаренко Н.И. \*, кандидат технических наук, доцент,  
Бондаренко Д.О., старший преподаватель,  
Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, Россия,  
Кочурин Д.В., магистрант,  
Белгородский университет кооперации экономики и права, Россия,  
Брагина Л.Л., доктор технических наук, профессор,  
Харьковский политехнический институт, Украина,  
Яловенко Т.А., магистрант,  
Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, Россия*  
\*Ответственный автор E-mail: di\_bondarenko@mail.ru

## ЛИСТОВЫЕ СТРОИТЕЛЬНЫЕ СТЁКЛА С ЗАЩИТНО-ДЕКОРАТИВНЫМИ ПОКРЫТИЯМИ

**Аннотация:** листовые стёкла с декоративными покрытиями в промышленном и гражданском строительстве играют важную роль в повышении эстетических свойств зданий различного назначения. Предложена инновационная технология получения декоративных покрытий на листовых стёклах с использованием низкотемпературной плазмы. Для плазменного напыления использовали измельченные в шаровой мельнице тарные стёкла разнообразной цветовой гаммы. Установлены оптимальные параметры плазменного напыления стеклопорошков на лицевую поверхность листовых стёкол. Для повышения прочности сцепления покрытия с основой перед плазменным напылением лицевую поверхность термообработывали отходящими плазмообразующими газами. Установлено, что с повышением температуры отходящих плазмообразующих газов и времени воздействия их на лицевую поверхность листового стекла прочность сцепления покрытия с основой увеличивается до 6,7 МПа. Исследовано влияние толщины покрытия на прочность его сцепления с основой. Увеличение толщины покрытия с 150 до 1000 мкм приводит к снижению прочности сцепления с 7,5 до 3,2 МПа. Под действием высоких температур электродуговой плазмы происходит не только увеличение в стёклах тугоплавких оксидов кремния и алюминия, но и повышение их твёрдости до 15%.

**Ключевые слова:** листовые стёкла, декоративные покрытия, низкотемпературная плазма, прочность сцепления, цветные тарные стёкла

### Введение

В соответствии с требованиями ГОСТ 111–2014 «Стекло листовое бесцветное. Технические условия» используются следующие виды листового цветного декоративного стекла, окрашенного в массу: накладное и стемалит. Окрашенное в массу стекло используют как для внешней, так и внутренней облицовки зданий. Накладное стекло идёт для облицовки световых проёмов и витражей, а стемалит – облицовки зданий и изготовления многослойных навесных панелей. Технология получения данных видов стёкол длительная во времени и весьма энергоёмкая [1-5].

Плазменные технологии высокоэффективны и характеризуются экологической безопасностью и энергосбережением [6-11]. Высокотемпературное воздействие плазменного факела повышает физико-химические и механические характеристики покрытий [12].

В ранее известных работах по декорированию стекла и изделий из него не рассматривались такие технологические факторы, как скорость прохождения плазменной горелки по лицевой поверхности стекла и температура предварительного подогрева подложки отходящими газами [13-15].

### Методы и материалы

В работе было использовано листовое стекло, соответствующее ГОСТ 111–2014 «Стекло листовое бесцветное. Технические условия», из которого были вырезаны образцы размером 200×200 и 300×300 мм, толщиной 4 мм. Для приготовления стеклопорошка использовали бой цветных тарных стёкол синего, коричневого, оливкового, тёмно-зеленого цветов. Стеклопорошок готовили путем измельчения в шаровой фарфоровой мельнице.

Для напыления использовался электродуговой плазмотрон УПУ-8м. Стеклопорошок подавали в порошковый питатель. Перед плазменным напылением лицевую поверхность вырезанных образцов обезжиривали ацетоном или метанолом.

Обезжиренные образцы помещали на пластичный конвейер, скорость которого регулировали в пределах 5-15 мм/с. На середине конвейера расположен возвратно-поступательный механизм, на котором закреплялась плазменная горелка ГН-5р. Также для работы установлена вытяжная вентиляция, от которой закреп-

лялся трубопровод для подачи горячих плазмообразующих газов в сопло. Сопло располагалось в начале конвейера для предварительного подогрева образцов из листового стекла перед плазменной обработкой. После подогрева образцы подавались в зону действия возвратно-поступательного механизма. Поток расплавленных частиц из горелки подавался отходящими плазмообразующими газами и напылялся на поверхность образцов.

Прочность сцепления покрытия с основой определяли на разрывной машине R-0,5, микротвёрдость напылённого поверхностного слоя – на твердомере Виккерса NEXUS 4504-IMP. Оксидный состав стёкол определяли рентгенофлуоресцентным методом на приборе APL 9900 «Thermo scientific».

Стандартную обработку результатов измерений проводили при вероятности 0,95 с расчётом среднеквадратичного отклонения, доверительного интервала, коэффициента вариации, точности опыта и промахов.

### Результаты и обсуждения

Технология получения декоративных покрытий на листовом стекле включает следующие технологические операции (рис. 1).

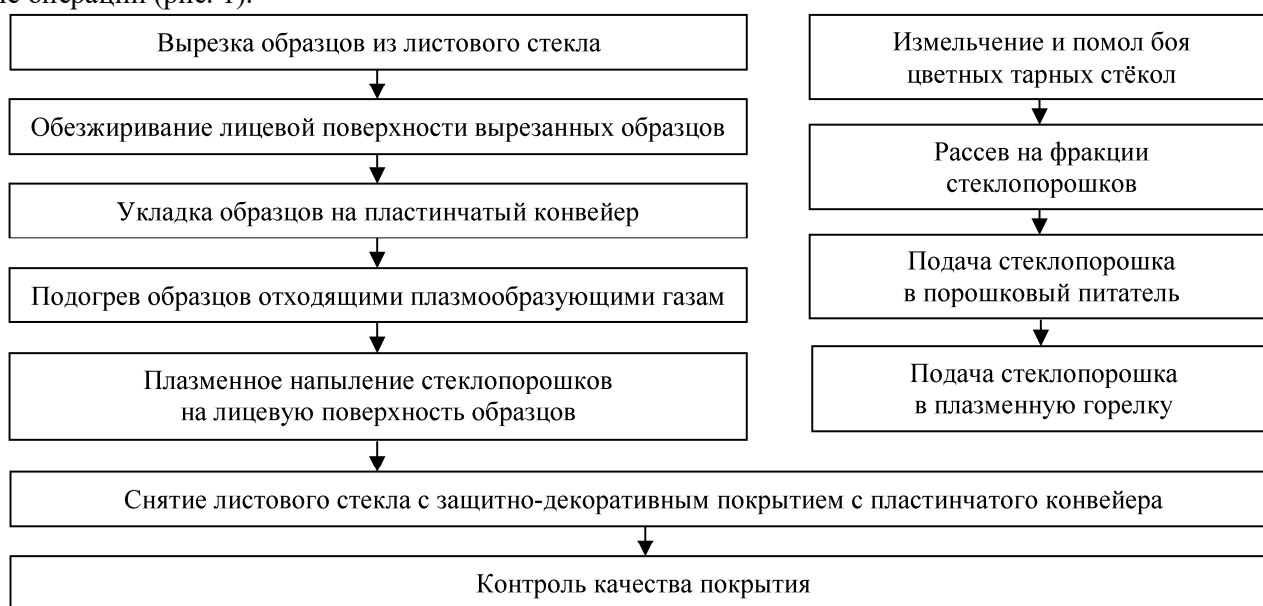


Рис. 1. Технология плазменного напыления стеклопорошков на листовые стекла  
Fig. 1. Technology of plasma spraying of glass powder on sheet glass

На первом этапе были проведены исследования по оптимизации технологических параметров, позволяющих регулировать толщину покрытия, которая зависит от скорости горелки и расхода стеклопорошка. Скорость прохождения горелки составляла 5, 10 и 15 мм/с, расход стеклопорошка – 1,25; 1,75; 2,00; 2,75 и 3,25 г/с (табл. 1). Толщина покрытия возрастает с уменьшением скорости прохождения до 5 мм/с и увеличением расхода стеклопорошка до 3,25 г/с.

Органолептическая оценка показала, что покрытие является сплошным и однородным при толщине до  $400 \pm 10$  мкм. Увеличение скорости прохождения до 15 мм/с позволит в 2 раза снизить энергозатраты. Оптимальными параметрами, экспериментально определенными, при толщине покрытия  $400 \pm 10$  мкм являются: расход стеклопорошка 2,0 г/с и скорость прохождения горелки по поверхности листового стекла – 15 мм/с.

На втором этапе исследовали влияние температуры и времени воздействия отходящих плазмообразующих газов на прочность сцепления покрытия с основой, которая является основным качественным показателем, характеризующим надёжность и долговечность изделия. Температура предварительного подогрева, которую контролировали платина-платинородиевыми термопарами, составляла 100, 150 и 200°C. Время воздействия отходящих плазмообразующих газов – в пределах от 5 до 100 с (табл. 2). Максимальная прочность сцепления покрытия толщиной  $400 \pm 10$  мкм достигает 6,7 МПа при температуре отходящих плазмообразующих газов 200 С и времени воздействия газов на поверхность образцов 15 с.

Таблица 1

**Влияние скорости прохождения горелки и расхода стеклопорошка на толщину покрытия**

Table 1

**Effect of burner speed and glass powder flow rate on coating thickness**

№ п/п	Скорость прохождения плазменной горелки по поверхности листового стекла, мм/с	Расход стеклопорошка, г/с	Толщина покрытия, мкм
1	5	1,25	400±10
		1,75	600±20
		2,00	800±20
		2,75	900±25
		3,25	1500±25
2	10	1,25	250±10
		1,75	450±10
		2,00	600±20
		2,75	800±20
		3,25	1000±25
3	15*	1,25	150±10
		1,75	250±10
		2,00*	400±10*
		2,75	650±20
		3,25	800±25

\* – оптимальный вариант

Таблица 2

**Влияние температуры и времени воздействия отходящих плазмообразующих газов на прочность сцепления покрытия с основой (400 мкм)**

Table 2

**Effect of temperature and time of exposure of plasma-forming exhaust gases on adhesion strength of coating with base (400 microns)**

№ п/п	Температура отходящих плазмообразующих газов, °С	Время воздействия отходящих плазмообразующих газов на поверхность стекла, с	Прочность сцепления, МПа
1	100	20	3,2
		40	3,6
		60	3,9
		80	4,1
		100	4,4
2	150	10	4,3
		20	4,5
		30	4,8
		40	5,1
		50	5,4
3	200*	5	5,2
		10	5,4
		15*	6,7*
		20	6,2
		25	5,8

\* – оптимальный вариант

На третьем этапе исследовали влияние толщины покрытия на прочность его сцепления с основой. С увеличением толщины с 150 до 1000 мкм прочность снижается с 7,5 до 3,2 МПа (табл. 3).

Таблица 3

**Влияние толщины покрытия на прочность его сцепления с основой**

Table 3

**The effect of coating thickness on the strength of its adhesion to the base**

№ п/п	Толщина покрытия, мкм	Прочность сцепления покрытия с основой, МПа
1	150	7,5
2	250	7,1
3	400*	6,7*
4	600	5,6
5	800	4,3
6	1000	3,2

\* – оптимальный вариант

С увеличением толщины в покрытии накапливаются внутренние напряжения, что приводит к уменьшению прочности сцепления.

Высокие температуры электродуговой плазмы вызывают интенсивные процессы испарения оксидов группы щелочных и щелочноземельных металлов вследствие интенсивного разогрева частиц стеклопорошка до 2000°C и выше. Вследствие этого в расплаве увеличивалось содержание таких тугоплавких оксидов как кремний и алюминий. В табл. 4 представлены результаты исследований оксидного состава стеклопорошков после их обработки электродуговой плазмой.

Таблица 4

**Содержание основных оксидов стёкол до и после высокотемпературного воздействия плазмы**

Table 4

**The content of basic glass oxides before and after high-temperature plasma exposure**

№ п/п	Наименование стёкол	Массовое содержание, мас. %									
		Na <sub>2</sub> O		CaO		MgO		Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		SiO <sub>2</sub>	
		до	после	до	после	до	после	до	после	до	после
1	Тарное зеленое стекло	13,0	12,4	10,0	9,6	2,0	1,8	3,3	3,8	70,5	71,8
2	Тарное коричневое стекло	13,2	12,6	8,0	7,7	4,0	3,8	1,9	2,4	71,7	72,6
3	Тарное синее стекло	17,2	16,3	4,7	4,2	2,2	1,9	5,2	5,6	67,5	69,1

Твёрдость декоративного покрытия характеризует его надёжность и долговечность. Под действием высоких температур электродуговой плазмы происходит не только увеличение в стёклах тугоплавких оксидов кремния и алюминия, но и повышение их твёрдости. В табл. 5 представлены результаты исследований твёрдости стёкол по Виккерсу до и после высокотемпературного воздействия плазмы.

Таблица 5

**Твёрдость стёкол до и после высокотемпературного воздействия плазмы**

Table 5

**Glass hardness before and after high-temperature plasma exposure**

Твёрдость по Виккерсу, HV					
Тарное зеленое стекло		Тарное коричневое стекло		Тарное синее стекло	
до обработки	после обработки	до обработки	после обработки	до обработки	после обработки
722	810	737	825	742	856

Изменение химического состава стёкол приводит к изменению термических свойств, в частности термического коэффициента линейного расширения (табл. 6).

Таблица 6

**Термический коэффициент линейного расширения стёкол до и после высокотемпературного воздействия плазмы**

Table 6

**Thermal coefficient of linear expansion of glasses before and after high temperature plasma exposure**

Термический коэффициент линейного расширения, 10 <sup>-7</sup> град <sup>-1</sup>					
Тарное зеленое стекло		Тарное коричневое стекло		Тарное синее стекло	
до обработки	после обработки	до обработки	после обработки	до обработки	после обработки
99	102	94	98	92	96

**Выводы**

Разработана технология получения декоративных покрытий на листовых стёклах. Установлено влияние высокотемпературного воздействия электродуговой плазмы на изменение химического состава стеклопорошков. Предложено использовать отходящие плазмообразующие газы для предварительного подогрева листовых стёкол с целью повышения прочности сцепления с основой. Показано, что при температуре подогрева 200°C прочность достигала 6,7 МПа, а также за счёт испарения оксидов щелочноземельной и щелочной группы покрытие обладает повышенной микротвёрдостью.

**Благодарность**

Работа выполнена при поддержке гранта Президента для научных школ НШ-2724.2018.8

**Литература**

1. Dorokhova E.S., Zhernovoi F.E., Izotova I.A., Bessmertnyi V.S. and etc. Shrink-free face material based on cullet and colemanite // Glass and Ceramics. 2016. Vol. 73. Issue 3-4. P. 103 – 106.
2. Dorokhova E.S., Zhernovaya N.F., Bessmertnyi V.S., Zhernovoi F.E. and etc. Control of the structure of porous glass-ceramic material // Glass and Ceramics. 2017. Vol. 74. Issue 3-4. P. 95 – 98.

3. Ryabova A.V., Yatsenko E.A., Klimova L.V., Goltsman B.M. and ets. Protection of steel pipelines with glass-enamel coatings based on silica-containing raw materials of the Far East of Russia // International Journal of Mechanical Engineering and Technology. 2018. Vol. 9. Issue 10. P. 769 – 774.
4. Yatsenko E.A., Zubekhin A.P., Klimenko E.B. Electrochemical methods for improving the strength of adhesion of one-coat glass enamels to substrate // Glass and Ceramics. 2004. Vol. 61. Issue 3-4. P. 90 – 93.
5. Yatsenko E.A. Specific features of the resource-saving technology of functional single-layer composite enamel coatings for steel // Glass Physics and Chemistry. 2011. Vol. 37. Issue 1. P. 41 – 50.
6. Bessmertny V.S., Min'ko N.I., Bondarenko N.I., Simachev A.V. and ets. Evaluation of the competitiveness of wall building materials with glassy protective-decorative coatings obtained by plasma fusing // Glass and Ceramics. 2015. Vol. 72. Issue 1-2. P. 41 – 46.
7. Bondarenko D.O., Bondarenko N.I., Bessmertnyi V.S., Burlakov N.M. Plasma-chemical modification of concrete processed by colorific metal salts // Advances in Engineering Research. 2017. Vol. 133. P. 128 – 134.
8. Бондаренко Н.И., Бессмертный В.С., Ильина И.А., Гащенко Э.О. Глазурование изделий из бетона с использованием факела низкотемпературной плазмы // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2012. №2. С. 124 – 127.
9. Бессмертный В.С., Ильина И.А., Соколова О.Н. Получение защитно-декоративных покрытий на стеновых строительных материалах автоклавного твердения // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2012. №3. С. 155 – 157.
10. Волокитин Г.Г., Скрипникова Н.К., Волокитин О.Г. Разработка плазменных технологий для стройиндустрии // Актуальные проблемы современности. 2017. №1 (15). С. 150 – 154.
11. Волошко Н.И., Ковальченко Н.А., Здоренко Н.М., Купавцев Э.И. Повышение коррозионной стойкости бетонных изделий методом плазменной обработки // Международный журнал экспериментального образования. 2017. №1. С. 114.
12. Bondarenko D.O., Bondarenko N.I., Bessmertnyi V.S., Strokova V.V. Plasma-chemical modification of concrete // Advances in Engineering Research. 2018. Vol. 157. P. 105 – 110.
13. Bessmertnyi V.S., Krokhin V.P., Panasenko V.A., Nikiforov V.M. and ets. Glazed wall ceramics using kmawaste // Glass and ceramics. 1998. Vol. 55. Issue 7-8. P. 222 – 223.
14. Krokhin V.P., Bessmertnyi V.S., Panasenko V.A., Drizhd N.A. and ets. Decoration of glass and glass articles using the plasma-spraying method // Glass and Ceramics. 1999. Vol. 56. Issue 3-4. P. 78 – 80.
15. Bessmertnyi V.S., Krokhin V.P., Lyashko A.A., Drizhd N.A. and ets. Production of glass microspheres using the plasma-spraying method // Glass and Ceramics. 2001. Vol. 58. Issue 7-8. P. 268 – 269.

#### References

1. Dorokhova E.S., Zhernovoi F.E., Izotova I.A., Bessmertnyi V.S. and ets. Shrink-free face material based on cullet and colemanite. Glass and Ceramics. 2016. 73 (3-4). P. 103 – 106.
2. Dorokhova E.S., Zhernovaya N.F., Bessmertnyi V.S., Zhernovoi F.E. and ets. Control of the structure of porous glass-ceramic material. Glass and Ceramics. 2017. 74 (3-4). P. 95 – 98.
3. Ryabova A.V., Yatsenko E.A., Klimova L.V., Goltsman B.M. and ets. Protection of steel pipelines with glass-enamel coatings based on silica-containing raw materials of the Far East of Russia. International Journal of Mechanical Engineering and Technology. 2018. 9 (10). P. 769 – 774.
4. Yatsenko E.A., Zubekhin A.P., Klimenko E.B. Electrochemical methods for improving the strength of adhesion of one-coat glass enamels to substrate. Glass and Ceramics. 2004. 61 (3-4). P. 90 – 93.
5. Yatsenko E.A. Specific features of the resource-saving technology of functional single-layer composite enamel coatings for steel. Glass Physics and Chemistry. 2011. 37 (1). P. 41 – 50.
6. Bessmertny V.S., Min'ko N.I., Bondarenko N.I., Simachev A.V. and ets. Evaluation of the competitiveness of wall building materials with glassy protective-decorative coatings obtained by plasma fusing. Glass and Ceramics. 2015. 72 (1-2). P. 41 – 46.
7. Bondarenko D.O., Bondarenko N.I., Bessmertnyi V.S., Burlakov N.M. Plasma-chemical modification of concrete processed by colorific metal salts. Advances in Engineering Research. 2017. 133. P. 128 – 134.
8. Bondarenko N.I., Bessmertnyj V.S., Il'ina I.A., Gashchenko E.H.O. Glazurovanie izdelij iz betona s ispol'zovaniem fakela nizkotemperaturnoj plazmy. Vestnik Belgorodskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta im. V.G. SHuhova. 2012. 2. P. 124 – 127. (rus.)
9. Bessmertnyj V.S., Il'ina I.A., Sokolova O.N. Poluchenie zashchitno-dekorativnyh pokrytij na stenovyh stroitel'nyh materialah avtoklavnogo tverdeniya. Vestnik Belgorodskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta im. V.G. SHuhova. 2012. 3. P. 155 – 157. (rus.)

10. Volokitin G.G., Skripnikova N.K., Volokitin O.G. Razrabotka plazmennyyh tekhnologiy dlya strojindustrii. Aktual'nye problemy sovremennosti. 2017. 1 (15). P. 150 – 154. (rus.)
11. Voloshko N.I., Koval'chenko N.A., Zdorenko N.M., Kupavcev E.H.I. Povyshenie korrozionnoj stojkosti betonnyh izdelij metodom plazmennoj obrabotki. Mezhdunarodnyj zhurnal ehksperimental'nogo obrazovaniya. 2017. 1. P. 114. (rus.)
12. Bondarenko D.O., Bondarenko N.I., Bessmertnyi V.S., Strokova V.V. Plasma-chemical modification of concrete. Advances in Engineering Research. 2018. 157. P. 105 – 110.
13. Bessmertnyi V.S., Krokhin V.P., Panasenko V.A., Nikiforov V.M. and ets. Glazed wall ceramics using kmawaste. Glass and ceramics. 1998. 55 (7-8). P. 222 – 223.
14. Krokhin V.P., Bessmertnyi V.S., Panasenko V.A., Drizhd N.A. and ets. Decoration of glass and glass articles using the plasma-spraying method. Glass and Ceramics. 1999. 56 (3-4). P. 78 – 80.
15. Bessmertnyi V.S., Krokhin V.P., Lyashko A.A., Drizhd N.A. and ets. Production of glass microspheres using the plasma-spraying method. Glass and Ceramics. 2001. 58 (7-8). P. 268 – 269.

*Bondarenko N.I. \*, Candidate of Engineering Sciences (Ph.D.), Associate Professor,  
Bondarenko D.O., Senior Lecturer,  
Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, Russia,  
Kochurin D.V., Master Student,  
Belgorod University of Cooperation, Economics and Law, Russia,  
Bragina L.L., Doctor of Engineering Sciences (Advanced Doctor), Professor,  
Kharkiv Polytechnic Institute, Ukraine,  
Yalovenko T.A., Master Student,  
Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, Russia*  
\*Corresponding author E-mail: di\_bondarenko@mail.ru

## SHEET BUILDING GLASS WITH PROTECTIVE AND DECORATIVE COATINGS

**Abstract:** sheet glass with decorative coatings in industrial and civil construction play an important role in improving the aesthetic properties of buildings for various purposes. An innovative technology for obtaining decorative coatings on sheet glasses using low-temperature plasma is proposed. For plasma spraying crushed in a ball mill container glass of various colors was used. The optimal parameters of the plasma spraying of glass powders on the front surface of the glass sheets were established. To increase the adhesion strength of the coating to the substrate before plasma spraying, the front surface was heat treated with outgoing plasma-forming gases. It was found that with increasing temperature of the outgoing plasma-forming gases and the time of their impact on the front surface of the sheet glass, the adhesion strength of the coating with the base increases to 6.7 MPa. The effect of the coating thickness on the strength of its adhesion to the substrate is studied. Increasing the coating thickness from 150 to 1000  $\mu\text{m}$  reduces the adhesion strength from 7.5 to 3.2 MPa. Under the influence of high temperatures of arc plasma is not only an increase in the glass refractory oxides of silicon and aluminum, but also an increase in their hardness up to 15%.

**Keywords:** sheet glass, decorative coatings, low-temperature plasma, adhesion strength, colored container glass

**Для цитирования:** Бондаренко Н.И., Бондаренко Д.О., Кочурин Д.В., Брагина Л.Л., Яловенко Т.А. Листовые строительные стёкла с защитно-декоративными покрытиями // Строительные материалы и изделия. 2019. Том 2. №1. С. 11 – 16. DOI: 10.34031/2618-7183-2019-2-1-11-16

**For citation:** Bondarenko N.I., Bondarenko D.O., Kochurin D.V., Bragina L.L., Yakovenko T.A. Sheet construction glass with protective and decorative coatings. Construction Materials and Products. 2019. 2 (1). P. 11 – 16. DOI: 10.34031/2618-7183-2019-2-1-11-16

Поступила в редакцию 2 ноября 2018 г.  
Принята в доработанном виде 5 января 2019 г.  
Одобрена для публикации 2 февраля 2019 г.

Received: November 2, 2018.  
Revised: January 5, 2019.  
Accepted: February 2, 2019.