

## Исследование влияния ультрафиолетового излучения на эксплуатационные свойства алкидных лакокрасочных покрытий марки ПФ-115

**Аннотация.** Представлены результаты исследования влияния ультрафиолетового излучения (207 нм) на коррозионную стойкость, твердость и адгезию алкидных лакокрасочных покрытий. Установлено, что облучение лакокрасочных материалов в процессе их отверждения не оказывает существенного влияния на концентрацию элементов. Исследования коррозионной стойкости покрытий методом полярографических кривых в насыщенном растворе хлорида натрия показали, что облучение ультрафиолетовым излучением алкидных лакокрасочных покрытий в процессе отверждения приводит к повышению их коррозионной стойкости к агрессивным средам вследствие увеличения сплошности и гладкости. Показано, что адгезия облучаемых лакокрасочных покрытий не ухудшается, сохраняя свое максимально возможно значение. Обнаружено, что увеличение длительности облучения способствует увеличению коррозионной стойкости и твердости покрытий.

**Ключевые слова:** ультрафиолетовое излучение, твердость, коррозионная стойкость, элементный состав, адгезия.

DOI: <https://doi.org/10.32523/2616-6771-2021-137-4-22-30>

### Введение

В современном мире одним из самых распространенных способов защиты металлов от коррозии является нанесение на его поверхность лакокрасочных покрытий (ЛКП). Лакокрасочные материалы (ЛКМ), наносимые на поверхность, имеют свойство быстро высыхать, создавая пленку, которая удерживается силой адгезии [1]-[2]. Высокой адгезией практически к любым поверхностям характеризуются алкидные ЛКМ, в составе которых имеются органические растворители. Алкидные ЛКМ применяются для образования декоративных и электроизоляционных покрытий на изделиях. При этом ЛКП могут выступать в качестве ингибитора коррозии и выполняют не только защитную функцию, но и способны остановить коррозионные процессы, которые уже начались.

В конце 60-х годов 20 века получил промышленное развитие способ отверждения покрытий ультрафиолетовым излучением. В настоящее время он считается одним из наиболее перспективных благодаря относительно высокой производительности, малым затратам энергии, а также простому технологическому оборудованию. Главным образом, способ отверждения ЛКМ посредством облучения УФ-излучением используют при получении покрытий из материалов, отверждаемых за счет реакции полимеризации. Принцип отверждения в данном случае основан на способности ультрафиолетовых лучей инициировать реакцию полимеризации олигомерных материалов [3]-[5]. Стоит отметить, что вследствие быстропротекающего процесса полимеризации отверждение происходит с высокой скоростью.

С экологической точки зрения, важным преимуществом УФ-отверждения является то, что в этом случае используются только реакционноспособные вещества, поэтому не возникают проблемы, связанные с регенерацией растворителя. Отверждение происходит при комнатной температуре, следовательно, могут использоваться чувствительные к высоким температурам подложки. Отверждение ЛКМ УФ-излучением интересно с точки зрения экономического фактора: для выполнения работ по отверждению УФ-излучением требуется минимум людских

ресурсов и минимум рабочих площадей, т.к. управление установками, генерирующими УФ-излучение, достаточно простое [5]-[6].

В работах [7]-[8] проведен анализ способов модификации ЛКМ с использованием УФ-излучения. Предложены методики обработки промышленно выпускаемых ЛКП УФ-излучением. Показано, что действие УФ-излучения на поверхность эмалей приводит к модификации поверхности и соответствующим изменениям эксплуатационных характеристик, в частности твердости покрытий. Обнаружены зависимости твердости промышленно выпускаемой эмали от времени облучения УФ-излучением. Выявлены оптимальные режимы облучения данных покрытий с целью формирования защитных слоев с повышенной твердостью. Исследование морфологии поверхности ЛКП представлены в работе [9]. Показано, что облучение ЛКП приводит к изменению геометрии поверхности, что связано с радиационной модификацией пленкообразователя, а именно: с деструкцией, приводящей к разрыву связей в главных цепях и образованию молекул меньшей молекулярной массы.

Основная задача данных исследований – это разработать режимы проведения радиационной модификации УФ-излучением (207 нм) с целью получения ЛКП, обладающих хорошими защитными свойствами.

### Материалы и методы исследования

Объектами исследования влияния длительности УФ-излучения на свойства ЛКП являлись ЛКМ на основе алкидной краски марки ПФ-115. Краска наносилась ровным слоем на сталь 08 кп. Отверждение осуществлялось при облучении поверхности ЛКП УФ-излучением. Источником УФ-излучения служила эксимерная лампа на основе газовой смеси криптон-бром (KrBr), излучающая ультрафиолетовое излучение с длиной волны 207 нм. Покрытия отверждались в течение 15, 45 и 60 мин.

Для определения массовой доли химических элементов использовался метод рентгенофлуоресцентного анализа с помощью спектрометра Elvatech MCA (Украина). Данный метод основан на измерении интенсивности характеристического рентгеновского излучения атомов химических элементов. Полученный спектр состоял из набора аналитических линий в диапазоне от 2,5 кэВ - 30 кэВ. Регистрация интенсивностей осуществлялась при помощи многоканального спектрометра с энергодисперсионным полупроводниковым детектором (Si-p-i-n диод) с термоэлектронным охлаждением. Границы погрешности измерений ( $P=0,95$ ) по данной методике составляют  $\pm 30$  %.

Коррозионная стойкость алкидных лакокрасочных покрытий марки ПФ-115 исследовалась методом ускоренных испытаний посредством получения полярографических кривых, т.е. кривых анодного растворения, в насыщенном растворе хлорида натрия. Регистрацию кривых анодного растворения осуществляли с помощью полярографа ПУ-1 (Гомель, Беларусь), сопряженного с интерфейсным блоком Графит-2 (Москва, Россия) при скорости развертки 10 мВ/с [10].

Величину потенциала покрытия измеряли посредством измерения разности потенциалов между рабочим электродом (РЭ) и электродом сравнения (ЭС). В качестве ЭС использовали хлорсеребряный (Х.С.Э) ЭВЛ-4. Х.С.Э. был помещен в электролитический ключ 1Е5.184.307, заполненный насыщенным раствором хлористого калия, который подводился к обратной стороне РЭ. ЭДС цепи, составленной из стандартного водородного потенциала и ЭС Х.С.Э. равно 0,199 В при 25 °С. Полярографические кривые регистрировались через 20 и 120 мин коррозионных испытаний.

Твердость покрытий измерялась на твердомере CASON-59V (Китай) оснащенным индентором по Кнупу, который предназначен для измерения твердости полимерных материалов.

Адгезия измерялась методом решетчатого надреза по четырехбалльной шкале, согласно ГОСТ 9.302 [11].

## Результаты

Результаты исследования элементного состава алкидных лакокрасочных покрытий марки ПФ-115, отвержденной при воздействии УФ-излучения представлены в таблице 1.

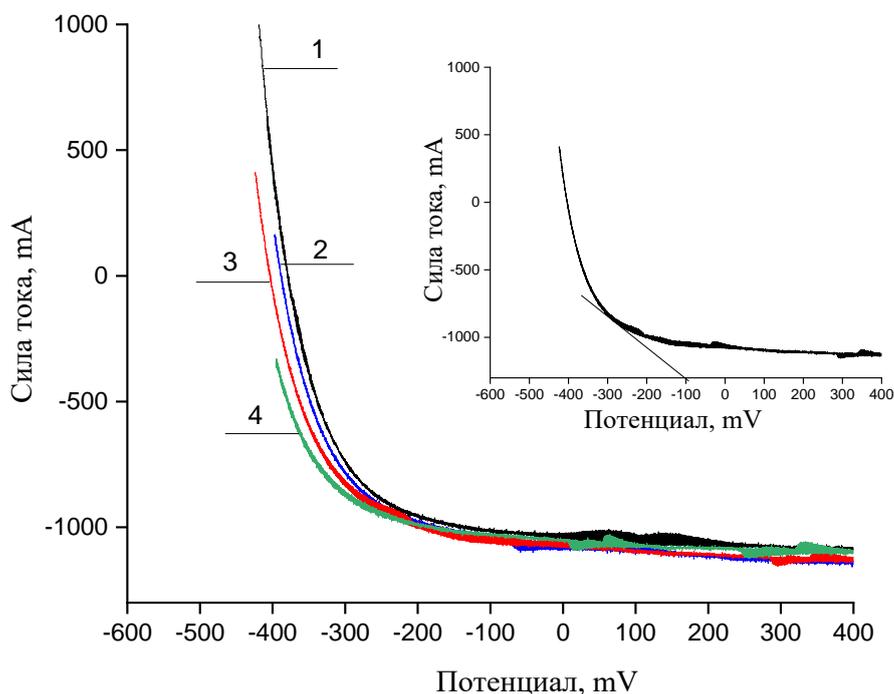
Таблица 1

### Концентрация химических элементов алкидных лакокрасочных покрытий марки ПФ-115, отвержденных УФ-излучением

Химические элементы	Концентрация элементов в ЛКП, отвержденных при облучении УФ-излучением %			
	Отверждение без УФ-излучения	Время отверждения УФ-излучением, мин		
		5	45	60
Ti	60,889	61,917	62,315	61,622
Ca	37,646	36,765	36,389	37,045
Zn	0,905	0,768	0,763	0,809
Rb	0,035	0,073	0,076	0,055
Sr	0,016	0,014	0,010	0,016
Zr	0,114	0,084	0,080	0,088
Pb	0,394	0,378	0,369	0,366

Анализ данных таблицы 1 показывает, что УФ-облучение ЛКМ ПФ-115 не оказывает существенного влияния на концентрацию элементов. Изменения концентрации элементов находятся в пределах погрешности. Полученные результаты вполне понятны, т.к. при радиационной модификации «готового» покрытия способ отверждения покрытий посредством облучения и в частности ультрафиолетовым излучением основан на полимераналогичных превращениях, учитывающих природу физических и фазовых состояний, влияющих на защитные свойства ЛКП, в том числе на коррозионную стойкость.

На рисунке 1 приведены кривые анодного растворения, характеризующие процесс коррозионного разрушения алкидных лакокрасочных покрытий марки ПФ-115, отвержденных при воздействии УФ-излучением в течение 5, 45 и 60 мин, а также ЛКП, отвержденных при естественных условиях. Кривые регистрировались после 20 мин коррозионных испытаний.



- 1 – отвержденные при естественных условиях; 2 – отвержденные при воздействии УФ-излучением в течение 5 мин;  
 3 – отвержденные при воздействии УФ-излучением в течение 45 мин;  
 4 – отвержденные при воздействии УФ-излучением в течение 60 мин

**Рисунок 1. Кривые анодного растворения лакокрасочного покрытия марки ПФ-115 после 20 мин коррозионных испытаний**

На рисунке 1 видно, что после 20 мин корродирования положение кривых анодного растворения ЛКП, облучаемых в процессе отверждения, смещается влево, в более электроотрицательную область в сравнении с кривыми от ЛКП, отвержденными при естественных условиях. При этом сама кривая больше наклонена к оси ординат. Данное смещение кривых анодного растворения свидетельствует об уменьшении скорости анодной реакции, т.е. скорости растворения подложки вследствие коррозии самого ЛКП и частичной ее пассивации. Пассивация может вызываться формированием на поверхности покрытия как адсорбционных слоев, так и фазовых оксидных или солевых пленок, образующихся вследствие растворения лакокрасочного покрытия. Образование плотных оксидных пленок способствует временному повышению устойчивости стали 08 кп к агрессивной солевой среде.

В таблице 2 представлены потенциалы разложения, рассчитанные при анализе кривых анодного растворения, показанных на рисунке 1. Как видно из таблицы, потенциал разложения покрытий зависит от режимов отверждения. Обнаружено, что у ЛКП, отвержденных при естественных условиях потенциал, составляет  $-75,60$  mV. При облучении ЛКМ в процессе отверждения в течение 60 мин потенциал смещается в более электроотрицательную область и составляет  $-121,20$  mV.

Таблица 2

**Потенциалы алкидного лакокрасочного покрытия марки ПФ-115  
после корродирования в течение 20 мин**

Потенциал, mV	Режим отверждения			
	Естественные условия	При облучении УФ-излучением 5 мин	При облучении УФ-излучением 45 мин	При облучении УФ-излучением 60 мин
		-75,60	-81,98	-102,27

Несмотря на то, что образование пассивирующих слоев сильно влияет на анодное растворение металлов, стоит учитывать, что продолжительное протекание коррозионных процессов на поверхности ЛКП приводит к разрушению пассивирующей пленки и к соответствующему изменению направления электродных процессов. Поэтому представляло интерес проведение коррозионных испытаний ЛКП в течение 120 мин УФ излучением в процессе отверждения.

Обнаружено, что потенциал разложения ЛКП ПФ-115, отвержденных при естественных условиях, с увеличением времени корродирования смещается в электроположительную область, что свидетельствует об интенсификации коррозионных разрушений. При этом положение кривых анодного растворения облучаемых УФ-излучением в процессе отверждения, относительно образцов, отвержденных при естественных условиях, смещается влево, в менее электроположительную область.

В таблице 3 представлены результаты анализа кривых анодного растворения при корродировании в течение 120 мин. Обнаружено, что потенциал алкидного лакокрасочного покрытия марки ПФ-115 при отверждении УФ-излучением и корродировании в течение 120 мин смещается в электроположительную область. Так, в частности потенциал алкидных лакокрасочных покрытий марки ПФ-115, отвержденных при естественных условиях, после корродирования в течение 20 мин, составил – 75, 6 mV, после корродирования в течение 120 мин составил 167,03 mV. Обнаружено, что потенциал покрытий, отвержденных при облучении УФ-излучением, смещается в менее электроположительную область. Так для ЛКП, отвержденного при УФ-излучением в течение 60 мин, после 20 мин корродирования составляет 108,66 mV.

Таблица 3

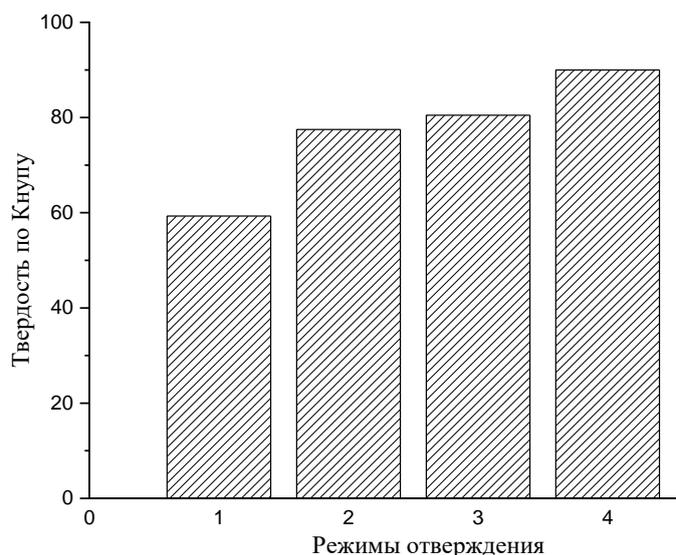
**Потенциалы алкидного лакокрасочного покрытия марки ПФ-115, после  
корродирования в течение 120 мин**

Потенциал, mV	Режим отверждения			
	Естественные условия	При облучении УФ-излучением 5 мин	При облучении УФ-излучением 45 мин	При облучении УФ-излучением 60 мин
		167,03	148,11	146,51

Как видно из таблицы 3, потенциал ЛКП, отвержденного при облучении УФ-излучением в течение 60 мин менее электроположителен в сравнении с потенциалом ЛКП, отвержденного при облучении УФ-излучением в течение 5 мин. Смещение потенциала в менее электроположительную область свидетельствует о снижении скорости растворения металлической подложки.

Таким образом, результаты полярографических исследований алкидных лакокрасочных покрытий марки ПФ-115, отвержденных при естественных условиях и при воздействии УФ-излучения, показали, что коррозионная стойкость облучаемых в процессе отверждения покрытий существенно возрастает. По всей видимости, увеличение коррозионной стойкости связано с формированием сплошного и гладкого покрытия, что препятствует возникновению питтинговой коррозии.

На рисунке 2 представлены результаты исследования твердости по Кнупу алкидных лакокрасочных покрытий марки ПФ-115, отвержденных при естественных условиях и при воздействии УФ-излучения в течение 5, 45 и 60 мин.



1 – отверждение при естественных условиях; 2 – отверждение при облучении УФ-излучением, 5 мин; 3 – отверждение при облучении УФ-излучением, 45 мин; 4 – отверждение при облучении УФ-излучением, 60 мин

**Рисунок 2. Зависимость твердости алкидных лакокрасочных покрытий марки ПФ-115 от времени отверждения УФ-излучением**

Из рисунка 2 видно, что при воздействии УФ-излучения твердость алкидных лакокрасочных покрытий марки ПФ-115 увеличивается. Так, в частности твердость по Кнупу покрытий, отвержденных при естественных условиях равна 59,3, а при воздействии УФ-излучением в течение 60 мин, равна 90. При увеличении времени отверждения УФ-излучением на алкидные лакокрасочные покрытия марки ПФ-115 твердость увеличивается. Увеличение твердости покрытий связано с интенсификацией процессов полимеризации алкидных лаков на основе смол, входящих в состав исследуемых красок. Стоит отметить, что приведенные данные были получены через сутки после облучения УФ-излучением.

При исследовании адгезии ЛКП, отвержденных при УФ-излучении, было обнаружено, что облучение УФ-излучением при отверждении ЛКП не влияет на адгезию. Адгезия алкидных лакокрасочных покрытий марки ПФ-115, отвержденных при естественных условиях и при воздействии УФ-излучения в течение 5, 45 и 60 мин, равна 1.

### Заключение

Проведены исследования влияния ультрафиолетового излучения (207 нм) на коррозионную стойкость, твердость и адгезию алкидных лакокрасочных покрытий марки ПФ-115. Исследования коррозионной стойкости покрытий методом полярографических кривых в насыщенном растворе хлорида натрия показали, что облучение ультрафиолетовым излучением алкидных лакокрасочных покрытий приводит к повышению их коррозионной стойкости к раствору насыщенному хлорида натрия вследствие увеличения сплошности и гладкости покрытий. Обнаружено, что увеличение длительности облучения способствует увеличению коррозионной стойкости.

Показано, что твердость алкидных лакокрасочных покрытий марки ПФ-115 с увеличением времени отверждения УФ-излучением возрастает.

Обнаружено, что облучение УФ-излучением при отверждении алкидных лакокрасочных покрытий марки ПФ-115 не ухудшает адгезию покрытий. Адгезия ЛКП марки ПФ-115 со сталью 08 кп составляет 1 балл согласно ГОСТ 9.302.

Полученные результаты имеют практическое значение при разработке технологических режимов получения лакокрасочных покрытий с повышенными эксплуатационными свойствами, посредством облучения УФ-излучением, что обеспечит увеличение срока эксплуатации окрашенных изделий и снизит затраты на их обслуживание.

### Список литературы

1. Лившиц М.Л. Лакокрасочные материалы: учеб.пособие. – Москва: Изд-во «Химия», 1982. – 360 с.
2. Валько Н.Г. Влияние УФ-излучения на структуру лакокрасочных покрытий с активными наполнителями // Технология органических веществ: материалы докладов 85-ой научно-технической конференции профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов (с международным участием). – Минск: Белорус. гос. техн. ун-т, 2021. – С. 236-237.
3. Бабкин О.Е. Полимерные покрытия УФ-отверждения: учеб.пособие. – Санкт-Петербург: Изд-во «СПбГУКиТ», 2012. – 47 с.
4. Прокопчук Н.Р. Химия и технология пленкообразующих веществ. – Минск: БГТУ, 2004. – 402 с.
5. Слепчук И. Исследование влияния сшивающих агентов на характеристики пространственной сетки и свойства стирол-акриловых полимерных пленок // Известия высших учебных заведений. Химия и химическая технология. – 2016. – Т.59. – №7. – С. 68-76.
6. Семенова И.В. Коррозия и защита от коррозии: учеб.пособие. – Москва: Изд-во «Физико-математическая литература», 2002. – 335 с.
7. Valko N. Structure and properties of paint coatings irradiated by ultraviolet rays / N. Valko, A. Hloba, A. Kasperovich // 7th International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects, Tomsk, September 14-26, 2020. P. 1024-1027.
8. Влияние УФ-излучения на твердость лаковых покрытий / Н.Г. Валько, С.Ю. Раюнчюс, А.И. Глоба, А.В. Касперович // Нефтехимия – 2019: материалы II Международного научно-технического и инвестиционного форума по химическим технологиям и нефтегазопереработке. – Минск: БГТУ, 2019. – С. 146-149.

9. Валько Н.Г. Модификация морфологии поверхности водно-дисперсионных лакокрасочных материалов УФ-излучением / Н.Г. Валько, А.И. Глоба, А.В. Касперович, Д.В. Духович // Технология органических веществ: материалы докладов 84-й научно-технической конференции посвященной 90-летию юбилею БГТУ и Дню белорусской науки, Минск / гл.ред.: И.В. Войтов. - Минск: БГТУ, 2020. - С. 207-208.

10. Елисеева В.И. Полимеризационные пленкообразователи. – Москва: Изд.-во «Химия», 1971. – 138 с.

11. Покрyтия металлические и неметаллические, неорганические. Методы контроля. ГОСТ 9.302-88.

**Н.Г. Валько, Д.И. Богдевич**

*Янка Купала Гродно мемлекеттік университеті, Гродно, Беларусь Республикасы*

### **Ультрақұлгін сәулеленудің ПФ-115 маркалы алкидті бояу жабындарының өнімділік қасиеттеріне әсерін зерттеу**

**Аннотация.** Ультрақұлгін сәулеленудің (207 нм) алкидті бояу мен лак жабындарының коррозияға төзімділігіне, қаттылығына және адгезиясына әсерін зерттеу нәтижелері берілген. Натрий хлоридінің қаныққан ерітіндісіндегі полярографиялық қисық сызықтар әдісімен жабындардың коррозияға төзімділігін зерттеу, алкидті бояу жабындарын ультрақұлгін сәулемен сәулелендіру олардың үздіксіздігінің, тегістігінің жоғарылауына байланысты агрессивті орталарға коррозияға төзімділігінің жоғарылауына әкелетінін көрсетті. адгезия. Сәулелену ұзақтығының ұлғаюы жабындардың коррозияға төзімділігі мен қаттылығының артуына ықпал ететіні анықталды.

**Кілт сөздер:** ультрақұлгін сәулелену, қаттылық, коррозияға төзімділік, элементтік құрам.

**N.G. Valko, D.I. Bogdevich**

*Yanka Kupala State University of Grodno, Grodno, Republic of Belarus*

### **Study of the influence of ultraviolet radiation on the performance properties of alkyd paint coatings of the PF-115 brand**

**Abstract.** The article presents results of studying the effect of ultraviolet radiation (207 nm) on corrosion resistance, hardness and adhesion of alkyd paint and varnish coatings. Studies of the corrosion resistance of coatings by the method of polarographic curves in a saturated solution of sodium chloride showed that irradiation of alkyd paint coatings with ultraviolet radiation leads to an increase in their corrosion resistance to aggressive media due to an increase in continuity, smoothness and adhesion. It has been found that an increase in the duration of irradiation contributes to an increase in the corrosion resistance and hardness of the coatings.

**Keywords:** ultraviolet radiation, hardness, corrosion resistance, elemental composition.

### **References**

1. Livshic M.L. Lakokrasochnye materialy: ucheb.posobie [Paints and varnishes: textbook]. (Izd-vo «Himiya», Moskva, 1982, 360 p.) [in Russian]

2. Val'ko N.G. Vliyanie UF-izlucheniya na strukturu lakokrasochnyh pokrytij s aktivnymi napolnitelyami. Tekhnologiya organicheskikh veshchestv: materialy dokladov 85-oj nauchno-tekhnicheskoy konferencii professorsko-prepodavatel'skogo sostava, nauchnyh sotrudnikov i

aspirantov (s mezhdunarodnym uchastiem) [Influence of UV radiation on the structure of paint and varnish coatings with active fillers. Technology of organic substances: materials of reports of the 85th scientific and technical conference of faculty, research workers and graduate students (with international participation)]. Minsk: Belorus. Gos. tekhn. un-t 2021, 236-237 p. [in Russian]

3. Babkin O.E. Polimernye pokrytiya UF-otverzhdeniya: ucheb.posobie [Polymer coatings UV-curing: textbook]. (Izd-vo «SPbGUKiT», SPb, 2012, 47 p.). [in Russian]

4. Prokopchuk N.R. Himiya i tekhnologiya plenkoobrazuyushchih veshchestv [Chemistry and technology of film-forming substances]. (Minsk: BGTU, 2004, 402 p.). [in Russian]

5. Slepchuk I. Issledovanie vliyaniya sshivayushchih agentov na harakteristiki prostranstvennoj setki i svoystva stirol-akrilovyh polimernyh plenok [Study of the effect of crosslinking agents on the characteristics of the spatial network and the properties of styrene-acrylic polymer films], Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Himiya i himicheskaya tekhnologiya [Proceedings of higher educational institutions. Chemistry and chemical technology], 59(7), 68-76 (2016). [in Russian]

6. Semenova I.V. Korroziya i zashchita ot korrozii: ucheb.posobie. [Corrosion and corrosion protection: textbook]. (Izd-vo «Fiziko-matematicheskaya literatura», Moskva, 2002, 335 p.). [in Russian]

7. Valko N. Structure and properties of paint coatings irradiated by ultraviolet rays, N. Valko, A. Hloba, A. Kasperovich, 7th International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects. Tomsk, 2020, 1024-1027 p.

8. Vliyanie UF-izlucheniya na tverdost' lakovyh pokrytij N.G. Val'ko, S.Ju. Rajunchjus, A.I. Globa, A.V. Kasperovich Neftehimija 2019: materialy II Mezhdunarodnogo nauchno-tehnicheskogo i investicionnogo foruma po himicheskim tehnologijam i neftegazopererabotke [Influence of UV radiation on the hardness of varnish coatings. Petrochemistry - 2019: materials of the II International Scientific, Technical and Investment Forum on Chemical Technologies and Oil and Gas Processing]. Minsk, BGTU, 2019, 146-149 p. [in Russian]

9. Val'ko N.G. Modifikacija morfologii poverhnosti vodno-dispersionnyh lakokrasochnyh materialov UF-izlucheniem N.G. Val'ko, A.I. Globa, A.V. Kasperovich, D.V. Duhovich Tehnologija organicheskikh veshchestv: materialy dokladov 84-j nauchno-tehnicheskoy konferencii posvjashhennoj 90-letnemu jubileju BGTU i Dnju belorusskoj nauki [Modification of the surface morphology of water-dispersion paints and varnishes by UV radiation. Technology of organic substances: materials of reports of the 84th scientific and technical conference dedicated to the 90th anniversary of BSTU and the Day of Belarusian Science]. Minsk, BGTU, 2020, 207-208 p. [in Russian]

10. Eliseeva V.I. Polimerizacionnye plenkoobrazovateli. [Polymerization film formers]. (Moskva: Izd-vo «Himiya», 1971, 138 p.). [in Russian]

11. Pokrytiya metallicheskie i nemetallicheskie, neorganicheskie. Metody kontrolya GOST 9.302-88 [Metallic and non-metallic, inorganic coatings. Control methods. GOST 9.302-88]. [in Russian]

#### Сведения об авторах:

**Валько Н.Г.** - кандидат физико-математических наук, доцент, заместитель декана физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, ул. Врублевского, 33, Гродно, Республика Беларусь.

**Богдевич Д.И.** - магистрант Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, ул. Врублевского, 33, Гродно, Республика Беларусь.

**Valko N.G.** - Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Deputy Dean of the Physics and Technology Faculty of Yanka Kupala State University of Grodno, 33 Vrublevsky str., Grodno, Republic of Belarus.

**Bogdevich D.I.** - Master student, Yanka Kupala State University of Grodno, 33 Vrublevsky str., Grodno, Republic of Belarus.