

УДК 667.661.92:692.8

А. С. Чуйков, С. А. Прохорчик

Белорусский государственный технологический университет

**РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ МОДУЛЯ
ТЕРМОРАДИАЦИОННОЙ КАМЕРЫ ДЛЯ СУШКИ
ЛАКОКРАСОЧНЫХ ПОКРЫТИЙ СТОЛЯРНО-СТРОИТЕЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЙ**

Материал статьи посвящен созданию модуля терморadiационной сушильной камеры. Авторами были проведены исследования по установлению размеров теплового пятна, создаваемого инфракрасным излучателем на расстоянии 500 и 1000 мм до нагреваемой поверхности, измерению максимальной и средней температур на поверхности образца. Полученные результаты были использованы при проектировании модуля терморadiационной сушильной камеры. Проведенные ранее исследования позволили разработать технологические режимы сушки водно-дисперсионных акриловых и полиуретановых лакокрасочных материалов. Сравнение режимных параметров конвективной и терморadiационной сушек выявило, что применение инфракрасного нагрева позволяет значительно ускорить процесс отверждения лакокрасочных материалов. На основании разработанных технологических режимов была предложена схема автоматизации процесса сушки и внедрена в модуль терморadiационной сушильной камеры. Для исследования разработанных технологических режимов в производственных условиях были подготовлены оконные блоки из древесины хвойных и лиственных пород. В качестве лакокрасочного материала использовалась белая водно-дисперсионная акриловая краска фирмы Remmers. В процессе исследования была проведена тепловизионная съемка поверхности оконного блока и измерена температура в разных точках образца. По результатам исследования сделаны соответствующие выводы.

Ключевые слова: терморadiационное отверждение, сушильная камера, тепловизионное исследование, режимы сушки, лакокрасочный материал.

A. S. Chuykov, S. A. Prokhorchik

Belarusian State Technological University

**DEVELOPMENT OF THE CONSTRUCTION OF THE MODULE
OF THERMORADIATION CHAMBER FOR DRYING PAINT-RELATED COATINGS
OF JOINT-STOCK PRODUCTS**

The article is devoted to the creation of a thermoradiation drying chamber module. The authors conducted studies on the establishment of the dimensions of the thermal spot created by the infrared emitter at a distance of 500 and 1000 mm to the heated surface, measuring the maximum and average temperature on the sample surface. The obtained results were used in the design of the thermoradiation drying chamber module. Previous studies have made it possible to develop technological regimes for drying water-dispersed acrylic and polyurethane paint and varnish materials. Comparison of the regime parameters of convective and thermoradiation drying revealed that the use of infrared heating makes it possible to significantly accelerate the process of curing paint and varnish materials. Based on the developed technological regimes, a scheme for automation of the drying process was proposed and introduced into the module of the thermoradiation drying chamber. To study the developed technological regimes in production conditions, window blocks were made from coniferous and hardwood. As a paint and varnish material, white water-dispersion acrylic paint from Remmers was used. During the research, a thermal imaging survey of the surface of the window unit was carried out and the temperature was measured at different points in the sample. Based on the results of the research, the relevant conclusions were drawn.

Key words: thermoradiation curing, drying chamber, thermal imaging study, drying modes, paint and varnish material.

Введение. В настоящее время перед деревообрабатывающими предприятиями Республики Беларусь ставится задача по увеличению объемов экспорта конкурентоспособной продукции. В связи с ростом жилищного строительства в странах ближнего и дальнего зарубежья увеличился спрос на столярно-строи-

тельные изделия (ССИ) из древесины, представленные в основном оконными и дверными блоками. Согласно данным статистического комитета Республики Беларусь, экспорт ССИ из дерева в 2015 и 2016 гг. составил 555,7 и 645,2 млн долл. США соответственно [1]. Увеличение объемов экспорта и обеспечение кон-

курентоспособности возможно за счет увеличения количества, сохранения качества и снижения себестоимости продукции.

Объем произведенных столярно-строительных изделий напрямую связан с производственной мощностью предприятия. Изменение этого показателя в большую сторону возможно при увеличении производственной площади или использовании более эффективного оборудования. Ввиду этого применение энергоэффективных, высокопроизводительных, мобильных («гибких») терморadiационных сушильных установок позволит высушить лакокрасочное покрытие в короткие сроки с сохранением надлежащего качества поверхности изделий и без увеличения производственной площади. В связи с этим была сформулирована цель работы, заключающаяся в создании модульной системы сушильной терморadiационной камеры.

Основная часть. При проектировании модуля терморadiационного отверждения учитывались особенности каждого оборудования, входящего в состав камеры, и существующие рекомендации авторов [2–4].

Для исследования распределения температуры от одного инфракрасного излучателя использовались специализированный портативный поверенный прибор – тепловизор FLIR Thermacam E300 (рис. 1) и методика проведения энергетических обследований, описанная в [5]. Прибор представляет собой оптико-электронную систему, позволяющую сформировать из теплового (инфракрасного) излучения обследуемого объекта или места визуально видимое изображение на дисплее. Принцип работы тепловизора основан на разнице температуры поверхности различных тел, отличиях в отражающей или поглощающей способности инфракрасного излучения различными материалами. К тому же, неравномерность нагрева одной и той же поверхности позволяет формировать картину распределения температуры на ней, ассоциируя определенный цвет на дисплее с конкретной температурой, при этом температурное разрешение составляет величину 0,05–0,10°C. Использование тепловизионного обследования позволило определить фактические данные о распределении температуры по поверхности, настроить и выставить в правильное положение излучателя. При помощи тепловизионной съемки были выявлены критические зоны, в которых не высох лакокрасочный материал.

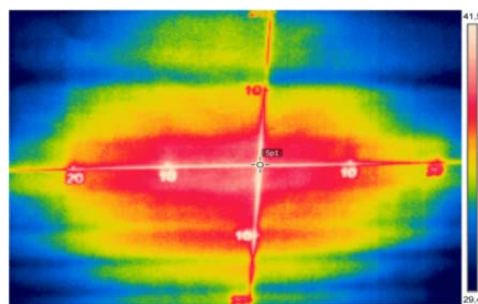
При проведении исследований использовали однократные измерения, в ходе которых исследовали энергоэффективность отдельного объекта (галогенового инфракрасного излучателя) при работе в определенном режиме.



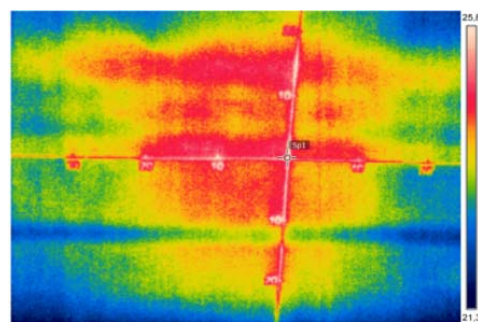
Рис. 1. Общий вид прибора FLIR Thermacam E300

По завершению исследований определяли зависимости распределения температуры по поверхности от времени.

Полученные изображения обрабатывали при помощи программного обеспечения Thermacam QuickReport 1.2. Данная программа позволила построить распределение температуры по поверхности образца, измерить температуру в заданных точках и установить среднюю в выделенном диапазоне. Результаты энергетического исследования поверхности представлены на рис. 2.



а



б

Рис. 2. Карты распределения температуры при расстоянии между излучателем и поверхностью 500 мм (а) и 1000 мм (б) после 15 мин нагрева

При помощи меток были установлены длина и ширина теплового следа, которые составили:

- для расстояния 500 мм – 400×300 мм;
- для расстояния 1000 мм – 400×400 мм.

Принимая во внимание технические характеристики ламп [6], а также согласно проведенным исследованиям, излучатели были установлены через каждые 400 мм.

Анализ полученных изображений позволил измерить среднюю ($44,5^{\circ}\text{C}$) и максимальную температуру на поверхности, которая составила $46,7^{\circ}\text{C}$ для расстояния (между излучателем и нагреваемой поверхностью) 500 мм и $24,3^{\circ}\text{C}$ для расстояния 1000 мм. Согласно литературе [7] температура плавления смолы хвойных пород древесины составляет $55 \pm 5^{\circ}\text{C}$. Расположение излучателя на расстоянии до облучаемой поверхности в 500 мм не будет вызывать образования дефекта «пробитие смолы». Установка расстояния между излучателем и образцом в 1000 мм не вызвала интенсификации пленкообразования лакокрасочного покрытия.

Для увеличения коэффициента полезного действия камеры, снижения теплопотерь и попадания излучения в «зоны тени» было принято решение установить отражатели, изготовленные из листа полированной нержавеющей стали.

Экспериментально выявлено, что в процессе инфракрасной сушки в начальный промежуток времени испаряется большое количество паров растворителей и разбавителей. В связи с этим их необходимо своевременно удалять из зоны сушки. Для этого в модуле была предусмотрена система принудительной вентиляции.

Для равномерного нагрева поверхности оконного блока «ОД 15-9 СП» были взяты три инфракрасные коротковолновые лампы с красной кварцевой колбой и индивидуальным отражателем, имеющие мощность 1000 Вт каждая. Для организации принудительной вентиляции были взяты 4 канальных вентилятора ВКО-150 диаметром 150 мм и мощностью 24 Вт каждый.

Каркас модуля был изготовлен из профильных стальных труб, имеющих сечения 20×40 мм, 40×40 мм и 40×60 мм.

Подключение электроприборов осуществлялось посредством кабеля ВВГ-2 \times 2,5 и ВВГ-2 \times 1,5.

Чертежи инфракрасного сушильного модуля представлены на рис. 3.

С использованием современных средств визуализации по разработанным чертежам была построена 3D-модель установки, изображенная на рис. 4.

Для организации процесса сушки лакокрасочных материалов необходимо соблюдать рекомендованные режимы.

Проведенные ранее исследования [8] и полученные зависимости [9] позволили разработать рекомендации по назначению режимов терморadiационного отверждения ВД-АК и ПУР ЛКМ на поверхности ССИ из древесины (табл. 1–2).

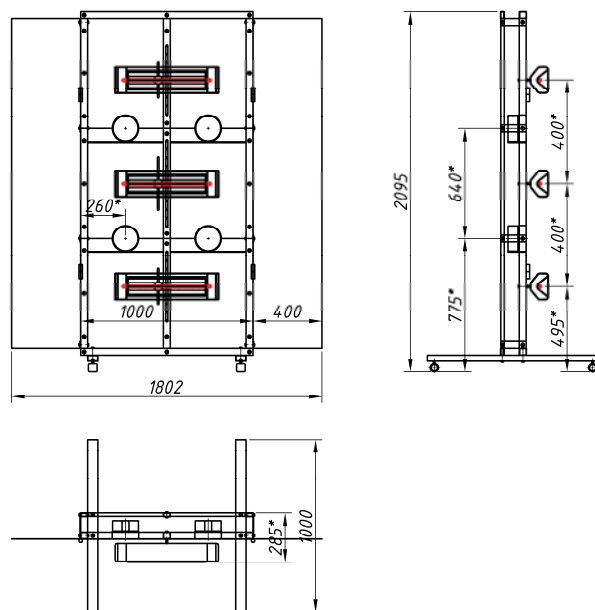


Рис. 3. Общий вид инфракрасного сушильного модуля

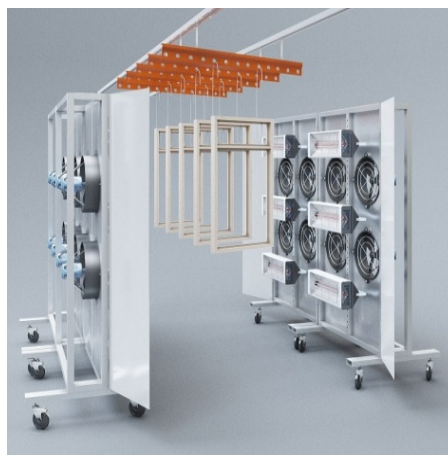


Рис. 4. 3D-модель инфракрасной сушильной камеры

Общая продолжительность полного высыхания одного слоя ВД-АК ЛКМ составила 30 мин (выдержка + сушка). Для ПУР ЛКМ время цикла отверждения зависит от того, на какую поверхность производят нанесение. При создании первого слоя покрытия на древесине цикл сушки составил 11–16 мин. При нанесении второго слоя покрытия – 46–54 мин.

Согласно технической информации на ВД-АК [10] и ПУР [11] ЛКМ, разработанные технологические режимы терморadiационного отверждения позволили значительно сократить цикл сушки (в сравнении с конвективной: для ВД-АК ЛКМ – в 3 раза, для ПУР – в 2 раза).

Для контроля процесса сушки была разработана система управления сушильной установкой на базе программируемого микроконтроллера Arduino UNO.

Таблица 1

Режим инфракрасной сушки водно-дисперсионных акриловых лакокрасочных материалов

Вид ЛКМ		Белая водно-дисперсионная краска	Черная водно-дисперсионная краска
Техн. операция			
Нанесение 1-го и 2-го слоев			
1. Выдержка		10 мин при $T = 20 \pm 2^\circ\text{C}$, $W = 70 \pm 5\%$	
2. Сушка	Расстояние от излучателя до образца, мм	500	
	Толщина сырой пленки, мкм	200	
	Время отверждения, мин	20	
3. Охлаждение		10 мин при $T = 20 \pm 2^\circ\text{C}$, $W = 60 \pm 5\%$	

Таблица 2

Режим инфракрасной сушки полиуретановых лакокрасочных материалов

Вид ЛКМ		Лак	Эмаль
Техн. операция			
Нанесение 1-го слоя			
1. Выдержка		10 мин при $T = 20 \pm 2^\circ\text{C}$, $W = 70 \pm 5\%$	
2. Сушка	Расстояние от излучателя до образца, мм	500	
	Толщина сырой пленки, мкм	100 (200)	
	Время отверждения, мин	11 (16)	
3. Охлаждение		10 мин при $T = 20 \pm 2^\circ\text{C}$, $W = 60 \pm 5\%$	
Нанесение 2-го слоя			
4. Выдержка		10 мин при $T = 20 \pm 2^\circ\text{C}$, $W = 70 \pm 5\%$	
5. Сушка	Расстояние от излучателя до образца, мм	500	
	Толщина сырой пленки, мкм	100 (200)	
	Время отверждения, мин	46 (54)	
6. Охлаждение		10 мин при $T = 20 \pm 2^\circ\text{C}$, $W = 60 \pm 5\%$	

Платформа состоит из аппаратной и программной частей. Для программирования использовалась упрощенная версия языка C++, известная также как Wiring. Разработка проводилась с применением среды Arduino IDE. Связь платформы с компьютером осуществлялась посредством порта USB.

Для организации процесса инфракрасной сушки предварительно была собрана схема автоматизации, изображенная на рис. 5.

Для этой схемы автоматизации составлялась программа управления лампами по установленным режимам. На первом этапе микроконтроллер включает все лампы и они работают в течение 5 мин. Осуществляется предварительный нагрев древесины и, как следствие, происходит интенсивное испарение растворителя за счет передачи большого количества энергии.

Одновременно с лампами запускаются осевые вентиляторы для удаления выделенных паров. По достижении на поверхности детали температуры в $40 \pm 5^\circ\text{C}$ микроконтроллер отключает лампы и вентиляторы. Как только температура на поверхности детали достигнет

35°C , микроконтроллер вновь включает лампы и цикл повторяется. Согласно ранее проведенным исследованиям, время цикла было ограничено 20 мин.

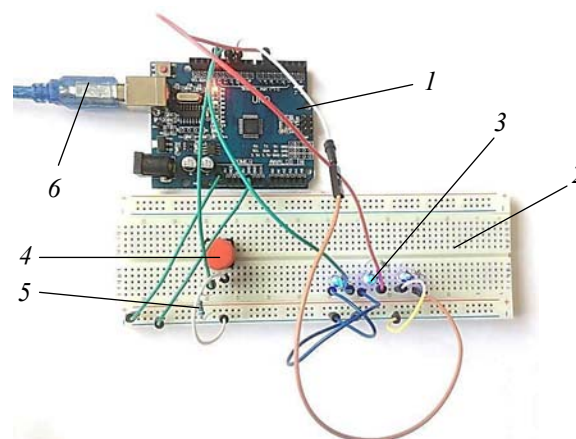


Рис. 5. Схема автоматического управления процессом инфракрасной сушки:

- 1 – программируемый логический контроллер;
- 2 – макетная плата; 3 – светодиод; 4 – кнопка;
- 5 – стягивающий резистор; 6 – USB разъем

Разработанная программа была записана в программируемый логический контроллер при помощи USB кабеля. При нажатии на кнопку запускается предустановленная программа-режим. При этом светодиоды отражают включение инфракрасных ламп, которые подключаются к данной схеме через реле. При подаче управляющего сигнала на реле оно замыкается и лампа включается.

После создания экспериментального модуля установки терморadiационного отверждения было проведено опытно-промышленное испытание технологии терморadiационного отверждения водно-дисперсионного лакокрасочного покрытия оконного блока на ЗАО «ВиндоВуд». Испытание заключалось в оценке распределения температуры по поверхности лакокрасочного покрытия, нанесенного на оконный блок.

Для проведения исследований были подготовлены две партии оконных блоков «ОД 1 О 15-9 ССП» (классификация согласно СТБ 939-2013 [12]) по 5 шт. в каждой, изготовленные из древесины сосны и дуба, имеющие влажность 9–10% и шероховатость поверхности не более 200 мкм (ГОСТ 7016-2013 [13]). Поверхности образцов предварительно шлифовали шкурками P80→P120→P150. На подготовленную поверхность было нанесено два слоя грунтовки GW-360 фирмы Remmers. Перед нанесением слоя краски поверхность подвергли предварительному легкому шлифованию шлифовальной шкуркой P240.

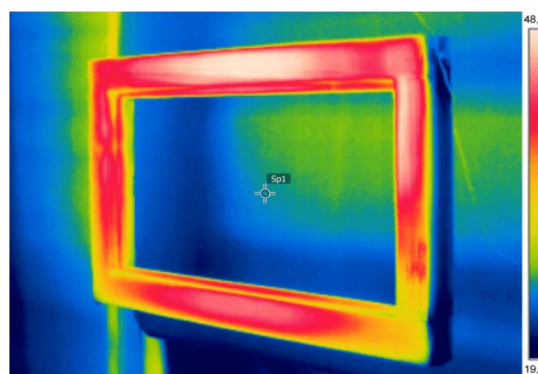
В качестве основного лакокрасочного материала применялась белая водно-дисперсионная акриловая краска DW-601 фирмы Remmers (Германия). На подготовленную поверхность оконных блоков (створок и коробки) наносили лакокрасочное покрытие безвоздушным распылением (диаметр сопла 0,28 мм, давление лакокрасочного материала 105 бар) с контролем толщины сырого слоя ($S = 200 \pm 25$ мкм) в соответствии с СТБ ГОСТ Р 51694–2001 [14] при помощи откалиброванной гребенки.

После нанесения образец подвешивали на траверсу конвейера и проводили предварительную технологическую выдержку, которая составила 10 мин (температура окружающей среды 22°C, относительная влажность 65%). Ранее используемая методика энергетического обследования позволила оценить распределение температуры по поверхности лакокрасочного покрытия, нанесенного на оконный блок (рис. 6).

Согласно показаниям прибора средняя температура на поверхности оконного блока на 20-й минуте составила 46,7°C. Данная температура не вызывает плавления смолы и образования дефектов сушки [15].



а



б

Рис. 6. Расположение излучателя и образца (а); распределение температуры по поверхности оконного блока (б)

Определение степени высыхания ЛКП проводили при помощи разработанной методики, которая заключалась в следующем: на поверхность образца помещали другой с заранее высушенным покрытием таким образом, чтобы лицевые части были повернуты друг к другу. После этого к поверхности прикладывали нагрузку 2 кг и выдерживали под давлением 60 с. Далее нагрузку снимали и выдерживали образцы 30 с, после чего поднимали (за верхний) образцы на высоту 40–50 мм. Если поверхности образцов при этом легко разъединялись без образования дефектов на покрытии, то 3-я степень высыхания считалась достигнутой. В противном случае – не достигнутой. При проведении испытаний 3-я степень высыхания была достигнута на всех образцах.

Заключение. Использование тепловизора FLIR Thermacam E300 позволило исследовать распределение температуры по поверхности, установить среднюю (44,5°C) и максимальную (46,7°C) температуру на участке, учесть полученную информацию при создании модуля камеры терморadiационной сушки. Разработанные режимы терморadiационного отверждения полиуретановых и водно-дисперсионных акриловых лакокрасочных материалов позволили добиться сокращения цикла сушки (в

сравнении с конвективной: для ВД-АК ЛКМ – в 3 раза, для ПУР – в 2 раза) без образования дефектов на поверхности покрытия. Опираясь на проведенные ранее исследования и используя современные средства автоматизации, был создан модуль терморadiационной сушильной камеры, который подтвердил эффективность разработанных технологических режимов. Про-

веденные в производственных условиях исследования доказали, что переход деревообрабатывающих предприятий, занимающихся производством ССИ, с технологии конвективной сушки лакокрасочных покрытий на терморadiационную позволит повысить эффективность производства за счет снижения производственного цикла.

Литература

1. Промышленность Республики Беларусь. Статистический сборник. Минск: Национальный статистический комитет Республики Беларусь, 2017. С. 102.
2. Лебедев П. Д. Расчет и проектирование сушильных установок. М.: Госэнергоиздат, 1963. 320 с.
3. Лебедев П. Д. Теплоиспользующие установки промышленных предприятий. М.: Энергия, 1970. 408 с.
4. Рысин С. А. Вентиляционные установки машиностроительных заводов. М.: Машиностроение, 1964. 704 с.
5. Млынчик В. И. Методика проведения энергетических обследований. СПб.: СРО НП «Три Э», 2011. 128 с.
6. OSRAM. Специальные ультрафиолетовые и инфракрасные лампы и системы. М.: OSRAM GmbH, 2008. 61 с.
7. Сумароков В. П. Химия и технология переработки древесных смол. М.: Гослесбумиздат, 1953. 238 с.
8. Прохорчик С. А., Чуйков А. С. Интенсификация отверждения водно-дисперсионных лакокрасочных материалов на древесине терморadiационным способом // Труды БГТУ. 2017. № 2: Лесная и деревообработ. пром-сть. С. 266–272.
9. Чуйков А. С., Прохорчик С. А. Моделирование процесса отверждения водно-дисперсионных и полиуретановых лакокрасочных материалов при терморadiационном нагреве // Науковий вісник НЛТУ України. 2017. Вып. 27(5). С. 89–92.
10. Техническое описание. Induline DW-601 Aqua Stopp. М.: Remmers GmbH., 2017. 3 с.
11. Техническое описание. Renner FOXX M003. М.: Renner GmbH., 2017. 58 с.
12. Окна и балконные двери для зданий и сооружений. Общие технические условия: СТБ 939-2013. Введ. 06.01.2014. Минск: РУП «Стройтехнорм», 2014. 33 с.
13. Изделия из древесины и древесных материалов. Параметры шероховатости поверхности: ГОСТ 7016-2013. Введ. 01.01.2014. М.: Стандартиформ, 2014. 15 с.
14. Материалы лакокрасочные. Определение толщины покрытия: СТБ ГОСТ Р 51694-2001. Введ. 01.11.2002. Минск: БелГИИС, 2002. 19 с.
15. Материалы лакокрасочные. Термины и определения: ГОСТ 28246-2006. Межгос. стандарт. Введ. 01.01.2007. М.: Стандартиформ, 2006. 28 с.

References

1. *Promyshlennost' Respubliki Belarus'. Statisticheskiy sbornik* [Industry of the Republic of Belarus. Statistical compilation]. Minsk, Nacional'nyy statisticheskiy komitet Respubliki Belarus' Publ., 2017. P. 102.
2. Lebedev P. D. *Raschet i proektirovaniye sushil'nykh ustanovok* [Calculation and design of drying plants]. Moscow, Gosenergoizdat Publ., 1963. 320 p.
3. Lebedev P. D. *Teploispol'zuyushchiye ustanovki promyshlennykh predpriyatiy* [Heat-utilizing installations of industrial enterprises]. Moscow, Energiya Publ., 1970. 408 p.
4. Rysin S. A. *Ventilyatsionnyye ustanovki mashinostroitel'nykh zavodov* [Ventilation plants of machine-building plants]. Moscow, Mashinostroeniye Publ., 1964. 704 p.
5. Mlynchik V. I. *Metodika provedeniya energeticheskikh obsledovaniy* [Method of conducting energy surveys]. St. Petersburg, SRO NP "Tri E" Publ., 2011. 128 p.
6. OSRAM. *Spetsial'nyye ul'trafiol'etovyye i infrakrasnyye lampy i sistemy* [OSRAM. Special ultraviolet and infrared lamps and systems]. Moscow, OSRAM GmbH Publ., 2008. 61 p.
7. Sumarokov V. P. *Khimiya i tekhnologiya pererabotki drevesnykh smol* [Chemistry and technology of processing of wood resins]. Moscow, Goslesbumizdat Publ., 1953. 238 p.

8. Prokhorchik S. A., Chuykov A. S. Intensification of curing of water-dispersion paintwork materials on wood by a thermoradiation method. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], 2017, no. 2: Forest and Woodworking Industry, pp. 266–272 (In Russian).

9. Chuykov A. S., Prokhorchik S. A. Simulation of the curing process of water-dispersion and polyurethane paint and varnish materials under thermoradiation heating. *Naukoviy visnik NLTU Ukrainy* [Scientific Bulletin of UNFU], 2017, no. 27(5), pp. 89–92.

10. *Tekhnicheskoye opisanіye. Induline DW-601 Aqua Stopp* [Technical description. Induline DW-601 Aqua Stopp]. Moscow, Remmers GmbH. Publ., 2017. 3 p.

11. *Tekhnicheskoye opisanіye. Renner FOXX M003* [Technical description. Renner FOXX M003]. Moscow, Renner GmbH. Publ., 2017. 58 p.

12. STB 939-2013. Windows and balcony doors for buildings and structures. General specifications. Minsk, RUP “Stroytekhnorm” Publ., 2014. 33 p. (In Russian).

13. GOST 7016-2013. Products from wood and wood materials. Surface roughness parameters. Moscow, Standartinform Publ., 2014. 15 p. (In Russian).

14. STB GOST R51694-2001. Materials for paint and varnish. Determination of coating thickness. Minsk, BelGIIS Publ., 2002. 19 p. (In Russian).

15. GOST 28246-2006. Materials for paint and varnish. Terms and Definitions. Moscow, Standartinform Publ., 2006. 28 p. (In Russian).

Информация об авторах

Прохорчик Сергей Александрович – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры технологии и дизайна изделий из древесины. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: prohor@tut.by

Чуйков Алексей Сергеевич – магистр технических наук, ассистент кафедры технологии и дизайна изделий из древесины. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: offlex88@mail.ru

Information about the authors

Prokhorchik Sergey Aleksandrovich – PhD (Engineering), Associate Professor, Assistant Professor, the Department of Technology and Design of Wooden Articles. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: prohor@tut.by

Chuykov Aleksey Sergeevich – Master of Engineering, assistant lecturer, the Department of Technology and Design of Wooden Articles. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: offlex88@mail.ru

Поступила 25.10.2017