УДК 674.028.9 DOI: 10.18324/2077-5415-2018-3-149-153

Влияние параметров процесса склеивания древесины на прочность клеевого соединения

Н.А. Ерошкина[a], М.О. Коровкин[b]

Пензенский государственный университет архитектуры и строительства, ул. Германа Титова 28, Пенза, Россия
[a]n_eroshkina@mail.ru, [b]m_korovkin@mail.ru
[a]https://orcid.org/0000-0002-6062-6115, [b]https://orcid.org/0000-0001-5834-0727
Статья поступила 22.07.2018, принята 15.08.2018

В статье рассмотрена проблема оптимизации технологических параметров склеивания деревянных конструкций. Исследовано влияние расхода двухкомпонентного полимеризоцианатного клея Prefere 6151 с отвердителем Prefere 6651, давления и продолжительности прессования на прочность при скалывании вдоль волокон и характер разрушения, который оценивался по проценту разрушения по древесине. Для проведения исследования использован центральный композиционный план эксперимента, в котором в качестве варьируемых факторов выбраны давление прессования в интервале 0,4–0,6 МПа, расход клея в интервале от 200 до 400 г/м^2 и продолжительность прессования, составлявшая от 20 до 40 мин. На основе экспериментальных данных получены математические зависимости, описывающие влияние параметров процесса склеивания на прочность клеевого шва и характер разрушения. Исходя из требований к минимальному значению процента разрушения по древесине по ГОСТ 20850-2014 и полученных математических зависимостей прочности при скалывании от исследованных факторов, установлена область допустимых значений этих факторов. Выявлено, что максимальная прочность может быть получена при оптимальном давлении прессования 0,5 МПа. Показано, что максимальная прочность может быть достигнута при расходе клея 320 г/м^2 и продолжительности выдержки 35–40 мин. При увеличении расхода клея до 400 г/м^2 продолжительность выдержки может быть снижена до 20 мин, т. е. время прессования уменьшается на 40 %. При снижении и повышении давления прессования относительно оптимальных значений отмечено уменьшение прочности клеевого соединения. При пониженном давлении прессования уменьшение прочности связано с неравномерным распределением клея, а при повышенном — с выдавливанием клея из шва.

Ключевые слова: клееная древесина; прочность клеевого соединения; полимеризоцианатный клей; технологические параметры склеивания; оптимальный режим.

Effect of parameters of gluing process of wood on the strength of a glued joint

N.A. Eroshkina[a], M.O. Korovkin[b]

Penza State University of Architecture and Construction; 28, German Titov St., Penza, Russia
[a]n_eroshkina@mail.ru, [b]m_korovkin@mail.ru
[a]https://orcid.org/0000-0002-6062-6115, [b]https://orcid.org/0000-0001-5834-0727
Received 22.07.2018, accepted15.08.2018

The present paper deals with optimization problem of technological parameters of gluing of wood constructions. It was investigated that the influence of consumption of two-component adhesive system based on an emulsion polymer Prefere 6151 and an isocyanate hardener Prefere 6651, pressure and duration of pressing on the breaking strength along the fibers, and nature of failure, which was estimated by the percentage of wood damage. To carry out the study, the central composition plan of experiment was used. The pressing pressure in the range 0,4-0,6 MPa, the glue content in the range from 200 to 400 g/m^2 and the pressing time from 20 to 40 min as variable factors of the experiment were investigated. On the basis of the experimental data, mathematical dependences are obtained that describe the influence of the parameters of gluing process on the strength of glue joint and the nature of fracture. According to the requirements of GOST 20850-2014 to minimum value of destruction percentage in wood and the obtained mathematical dependences of shear strength of the studied factors, the range of admissible values of these factors was established. It was found that the maximum strength can be obtained at an optimum pressing pressure of 0,5 MPa. It was shown that the maximum strength can be achieved at dosage of glue of 320 g/m^2 and a holding time of 35-40 minutes. If the glue consumption is increased to 400 g/m^2, the holding time can be reduced to 20 min, that is, the pressing time is reduced by 40%. With a decrease and increase in the pressing pressure with respect to the optimum values, the strength of glue joint is reduced. With reduced compression pressure, the reduction of strength is due to the uneven distribution of adhesive, and at elevated pressure the glue is squeezed out of the seam.

Keywords: glued wood; glued wood strength; polymer isocyanate glue; technological parameters of gluing; optimum regime.

Введение

Производство клееных конструкций относится к числу прогрессивных способов использования древесины [1–4]. Эксплуатационные свойства клееной древесины позволяют изготавливать из нее конструкции с высокой несущей способностью, которые используются как для индивидуального строительства, так и для создания большепролетных конструкций [4–8]. В нашей стране в последние годы создано большое количество технологических линий по производству изделий из клееной древесины [9; 10].

Основным критерием качества склеивания является получение равнопрочных соединений, что может быть достигнуто за счет подбора клеев и оптимальных технологических режимов [11–15]. В технологии конструкций из клееной древесины широкое распространение нашли полимерные эмульсии с изоцианатным отвердителем, которые характеризуются высокими технологическими и эксплуатационными свойствами [11; 15–17].

Одним из технологических процессов, который в значительной степени влияет не только на качество склеивания, но и на производительность линии, является выдержка конструкции при прессовании во время склеивания [12; 13; 17]. Подбор рационального технологического режима процесса склеивания в зависимости от качества сырья и требуемой производительности позволит оптимизировать работу производственной линии в целом.

Основными параметрами технологии склеивания древесины являются расход клея, время выдержки и давление прессования [1; 7; 11–14; 16]. На прочность клеевого шва конструкции влияют характеристики сырья: шероховатость, покоробленность, поверхностные дефекты, влажность древесины, температура и условия эксплуатации конструкции [6; 7; 12; 18].

Оптимизация технологического режима склеивания древесины непосредственно на производственной линии характеризуется повышенной материало- и трудоемкостью. На начальных этапах этой работы целесообразно оптимизировать параметры склеивания на лабораторных образцах, что позволит выявить все значимые факторы, влияющие на прочность клеевого соединения. Для этого оправданно использование методов математического планирования эксперимента [12], с помощью которых можно оценить влияние на качество склеивания значительно большего числа факторов по сравнению с отработкой технологии на конструкциях в производственных условиях. Оптимизация технологического процесса склеивания древесины позволит улучшить экономические характеристики производства.

Целью работы является исследование влияния расхода полимеризоцианатного клея, давления и продолжительности прессования на предел прочности клеевого соединения при послойном скалывании и процент разрушения по древесине.

Методика исследования. Исследования прочности клеевого соединения проводились в соответствии с ГОСТ 33120-2014 [19]. Для склеивания образцов древесины использовался двухкомпонентный полимеризоцианатный клей Prefere 6151 (100 вес. ч.) с отвердителем Prefere 6651 (15 вес. ч.). В соответствии с рекомендациями производителя расход клея должен находиться в интервале 175–400 г/м², время прессования изделий — 30 мин [17].

Для определения границ технологических параметров склеивания необходима экспериментальная оценка влияния расхода клея, продолжительности и давления прессования на прочность клеевого шва при скалывании вдоль волокон.

Для проведения исследования использовался центральный композиционный план эксперимента, в котором значения основных уровней для давления прессования X_1, расхода клея X_2 и продолжительности прессования X_3 принимались соответственно 0,5 МПа, 300 г/м^2 и 30 мин. При этом интервалы варьирования факторов были приняты ±0,1 МПа, ±100 г/м^2 и ±10 мин соответственно. Обработка экспериментальных данных осуществлялась с помощью программы Gradient.

Для определения прочности клеевого соединения древесины были использованы образцы размерами 5×5×2,5 см из строганой доски сосны 2-го сорта влажностью 12 %. Размеры участков, на которые наносился клей, — 4×5 см.

Дозирование клея производилось по весу на лабораторных весах с погрешностью 0,001 г. После нанесения клея образцы прессовались на гидравлическом прессе при силе давления 800, 1 000 и 1 200 Н с продолжительностью 20, 30 и 40 мин в соответствии с планом эксперимента (табл. 1).

Таблица 1

Значения факторов в соответствии с планом эксперимента

№ состава	Кодовые значения факторов			Натуральные значения факторов		
	X_1	X_2	X_3	Давление прессования, *МПа*	Расход клея, *г/м^2*	Выдержка, *мин*
1	2	3	4	5	6	7
1	–1	–1	–1	0,4	200	20
2	–1	1	–1	0,4	400	20
3	–1	–1	1	0,4	200	40
4	–1	1	1	0,4	400	40
5	–1	0	0	0,4	300	30
6	0	–1	0	0,5	200	30
7	0	1	0	0,5	400	30
8	0	0	–1	0,5	300	20
9	0	0	1	0,5	300	40
10	0	0	0	0,5	300	30

№ состава	Кодовые значения факторов			Натуральные значения факторов		
	X_1	X_2	X_3	Давление прессования, *МПа*	Расход клея, *г/м²*	Выдержка, *мин*
11	1	–1	–1	0,6	200	20
12	1	1	–1	0,6	400	20
13	1	–1	1	0,6	200	40
14	1	1	1	0,6	400	40
15	1	0	0	0,6	300	30

Твердение клеевого соединения образцов проходило в лаборатории при 20 °С в течение 1 сут. После затвердевания образцов определялись значения прочности при скалывании клеевого соединения (σ) [19].

Для определения отношения площади разрушения образцов по древесине к площади разрушения по клеевой прослойке после испытания клеевой шов фотографировался с помощью цифровой камеры, и полученное изображение обрабатывалось в графическом редакторе AutoCad.

Результаты эксперимента и их обсуждение. Статистическая обработка результатов определения прочности клеевого шва при скалывании вдоль волокон σ и характера разрушения образцов древесины (процент разрушения по древесине $P_д$) позволила установить уравнения регрессии, описывающие зависимость этих свойств от исследованных факторов в кодовом выражении:

$$\sigma=7{,}443+1{,}577\cdot X_2+0{,}913\cdot X_3-0{,}2788\cdot X_1\cdot X_3- \\ -0{,}983\cdot X_1^2+0{,}62\cdot X_2^2-0{,}748\cdot X_3^2; \quad (1)$$

$$P_д=64{,}744+10{,}179\cdot X_1+9{,}647\cdot X_2+8{,}222\cdot X_3- \\ -11{,}564\cdot X_1\cdot X_2-13{,}64\cdot X_1\cdot X_3+5{,}916\cdot X_1^2-10{,}172\cdot X_3^2. \quad (2)$$

Графическая интерпретация полученных зависимостей представлена на рис. 1 и 2.

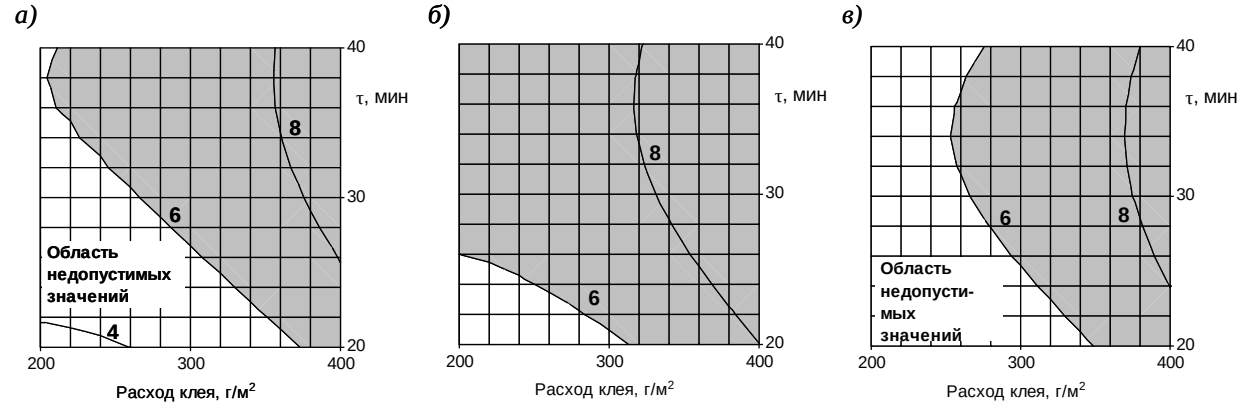

Рис. 1. Изолинии прочности клеевого шва в МПа при скалывании вдоль волокна в зависимости от расхода клея и времени выдержки τ при давлении прессования 0,4 (*а*); 0,5 (*б*) и 0,6 (*в*) МПа

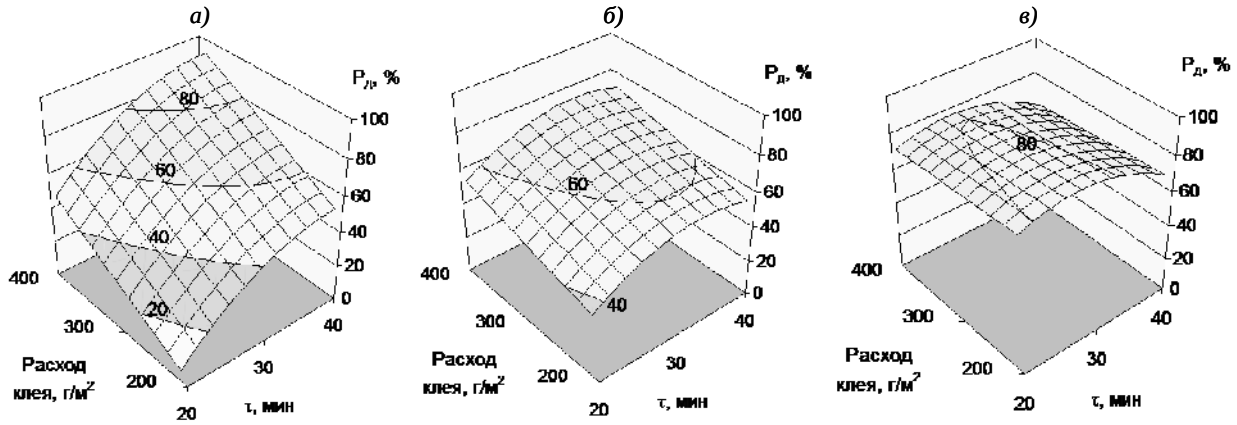

Рис. 2. Влияние расхода клея и времени выдержки при давлении прессования 0,4 (*а*); 0,5 (*б*) и 0,6 (*в*) МПа на процент разрушения образца соединения по древесине

Исходя из требований к минимальному значению процента разрушения по древесине по ГОСТ 20850-2014 [20] для различных значений пределов прочности на скалывание, была получена зависимость $R_д$=144 — 9·σ, где σ — среднее значение предела прочности на скалывание, *МПа*; $P_д$ — минимальный процент разрушения по древесине, %. Используя это уравнение и уравнение (2), были найдены области допустимых зна-

чений процента разрушения древесины в зависимости от полученных значений прочностей (рис. 3).

На рис. 3 приводятся графики зависимости расчетных значений минимально допустимых процентов разрушения древесины от исследованных факторов при различных давлениях прессования.

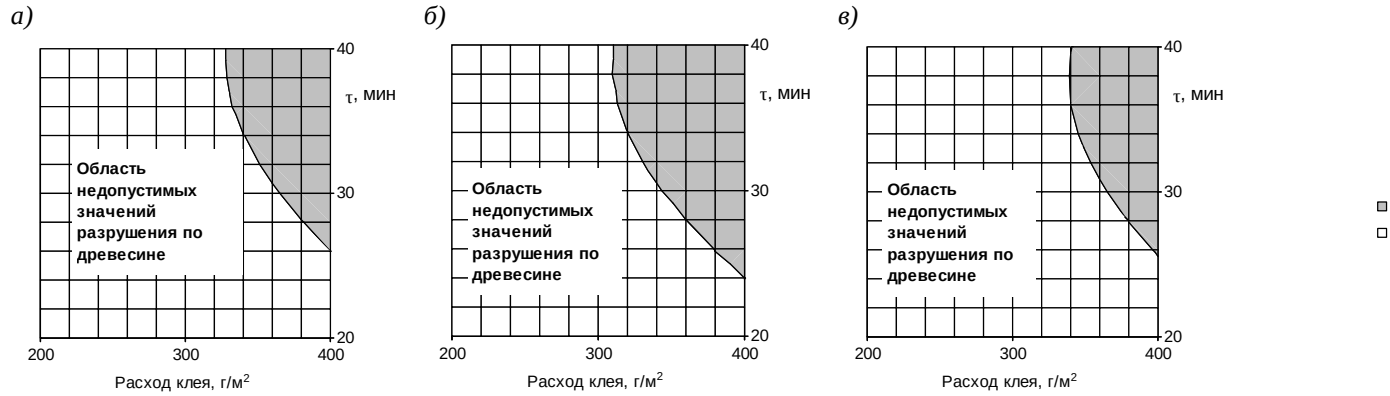

Рис. 3. Изолинии области недопустимых значений разрушения по древесине с учетом нормативных требований [20] в зависимости от расхода клея и времени выдержки при давлении прессования 0,4 (*а*); 0,5 (*б*) и 0,6 (*в*) МПа

Анализ графиков на рис. 1 показывает, что максимальная прочность может быть получена при давлении прессования 0,5 МПа (см. рис. 1 *б*). Анализ положения изолиний прочности клеевого шва 8 МПа на графике показывает, что эта прочность может быть достигнута при расходе клея 320 г/м^2 и продолжительности выдержки 35-40 мин, а увеличение расхода клея до 400 г/м^2 позволяет сократить продолжительность выдержки до 20 мин, т. е. сократить время прессования на 40 %.

Снижение прочности при уменьшении давления прессования (см. рис. 1 *а*) в наибольшей степени отмечается при сокращении продолжительности прессования и расхода клея. Более низкая прочность при минимальном давлении прессования связана с неравномерностью распределения клея по всей поверхности шва. Это предположение подтверждается снижением процента разрушения клеевого шва по древесине при уменьшении времени выдержки и дозировки клея (см. рис. 2 *а*).

Повышение давления прессования до 0,6 МПа (см. рис. 1 *в*) тоже приводит к некоторому снижению прочности клеевого шва. Это снижение связано с выдавливанием клея за пределы шва, что отмечалось визуально. При высоком давлении процент разрушения по древесине мало зависит от расхода клея и продолжительности прессования (см. рис. 2 *в*).

Можно отметить, что при повышении давления прессования зависимость процента разрушения по древесине возрастает, а влияние расхода клея и продолжительности выдерживания на эту характеристику клеевого шва снижается.

Анализ областей недопустимых значений разрушения по древесине (см. рис. 3) показывает, что качественный клеевой шов может быть получен только при расходе клея 350–400 г/м^2 и продолжительности выдержки под давлением не менее 30 мин.

Заключение

Проведенные исследования позволили установить, что оптимальное давление прессования для двухкомпонентного полимеризоцианатного клея Prefere 6151 с отвердителем Prefere 6651 при склеивании сосны составляет 0,5 МПа, что ниже рекомендуемых производителем клея значений 0,8–1,2 МПа [17].

Если загруженность технологической линии невелика, то продолжительность прессования может быть увеличена с 20 до 35 мин. При этом расход клея может быть снижен с 400 до 320 до г/м^2. С другой стороны, для сокращения продолжительности выдержки при склеивании расход клея должен быть увеличен.

В ходе исследований были установлены зависимости предела прочности при скалывании вдоль волокон и характера разрушения клеевого шва от расхода клея, давления и продолжительности прессования. Полученные уравнения могут быть использованы для оптимизации технологического процесса производства конструкций из клееной древесины.

Литература

1. Hiramatsu Y., Fujimoto K., Miyatake A., Shindo K., Nagao H., Kato H., Ido H. Strength properties of glued laminated timber made from edge-glued laminae II: bending, tensile, and compressive strengthof glued laminated timber // Journal of Wood Science. 2011. Vol. 57, Is. 1. P. 66-70.

2. Dietsch P., Tannert T. Assessing the integrity of glued-laminated timber elements // Construction and Building Materials. 2015. Vol. 101. P. 1259-1270.

3. Vladimir M., Mihai V. Economical Solutions for Short-span Bridges Using Reinforced Glue Laminated Timber and Steel // Procedia Engineering. 2016. Vol. 156. P. 227-232.

4. Bourreau D., Aimene Y., Beauchêne J., Thibaut B. Feasibility of glued laminated timber beams with tropical hardwoods // European Journal of Wood and Wood Products. 2013. Vol. 71, Is. 5. P. 653-662.

5. Frese M., Blab H.J. Statistics of damages to timber structures in Germany // Engineering Structures. 2011. Vol. 33, Is. 11. P. 2969-2977.

6. Otero-Chans D., Estévez-Cimadevila J., Martín-Gutiérrez E. Joints with bars glued-in softwood laminated timber subjected to climatic cycles // International Journal of Adhesion and Adhesives. 2018. Vol. 82. P. 27-35.

7. Stoeckel F., Konnerth J., Gindl-Altmutter W. Mechanical properties of adhesives for bonding wood – A review // Interna-

tional Journal of Adhesion and Adhesives. 2013. Vol. 45 . P. 32-41.

8. Dietsch P., Winter S. Structural failure in large-span timber structures: A comprehensive analysis of 230 cases // Structural Safety. 2018. Vol. 71. P. 41-46.

9. Фитчин А.А. Перспективы развития производства клеёного бруса в России // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. 2015. Т. 3, № 9-3 (20-3). С. 223-227.

10. Разиньков Е.М. Прочность склеивания пиломатериалов в технологии клееного бруса для жилых домов // Лесотехнический журнал. 2016. Т. 6, № 3 (23). С. 127-134.

11. Овсянников С.И., Богданов И.И. Особенности технологического процесса производства стенового клееного бруса // Вісник Харківського нац. техн. ун-ту сільського господарства. 2016. Вип.169. С. 58-63.

12. Мазаник Н.В., Божелко И.К. Оптимизация режима склеивания при производстве составных деревянных конструкций, эксплуатируемых в жестких условиях // Вісник Харківського нац. техн. ун-ту сільського господарства. 2016. Вип.169. С. 30-38.

13. Плотникова Г.П., Симонян С.Х. Разработка состава клеевой композиции для соединения массивной древесины в условиях Сибири // Системы Методы Технологии. 2017. № 4 (36). С. 169-175.

14. Федяев А.А., Федяева Н.Ю., Краснов А.А. Оценка влияния технологических факторов на прочность клееного бруса // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика: сб. науч. тр. ВГЛУ им. Г.Ф. Морозова, 2017. № 5 (31). С. 459-463.

15. Тамби А.А., Чубинский А.Н., Чаузов К.В., Кульков А.М. Исследование клеевых соединений древесины // Лесной вестник. 2016. № 2. С. 120-126.

16. Федяев А.А., Танковская Н.Ю. Обоснование расхода клея в производстве клееных деревянных конструкций // Труды Братского государственного университета. Сер. Естественные и инженерные науки. 2013. Т. 2. С. 126-129.

17. Техническое описание.Prefere 6151 [Электронный ресурс]. URL: http://prokleim.ucoz.ru/dynea/ Prefere_6151.pdf (дата обращения: 15.06.2018).

18. Frihart C.R. Adhesive groups and how they relate to the durability of bonded wood // Journal of adhesion science and technology. 2009. Vol. 23, № 4. P. 601-617.

19. ГОСТ 33120-2014. Конструкции деревянные клееные. Методы определения прочности клеевых соединений. Введ. с 2015-07-01. М.: ФГУП «Стандартинформ», 2014. 18 с.

20. ГОСТ 20850-2014. Конструкции деревянные клееные несущие. Общие технические условия. Введ. с 2015-07-01. М.: ФГУП «Стандартинформ», 2014. 14с.

References

1. Hiramatsu Y., Fujimoto K., Miyatake A., Shindo K., Nagao H., Kato H., Ido H. Strength properties of glued laminated timber made from edge-glued laminae II: bending, tensile, and compressive strengthof glued laminated timber // Journal of Wood Science. 2011. Vol. 57, Is. 1. P. 66-70.

2. Dietsch P., Tannert T. Assessing the integrity of glued-laminated timber elements // Construction and Building Materials. 2015. Vol. 101. P. 1259-1270.

3. Vladimir M., Mihai V. Economical Solutions for Short-span Bridges Using Reinforced Glue Laminated Timber and Steel // Procedia Engineering. 2016. Vol. 156. P. 227-232.

4. Bourreau D., Aimene Y., Beauchêne J., Thibaut B. Feasibility of glued laminated timber beams with tropical hardwoods // European Journal of Wood and Wood Products. 2013. Vol. 71, Is. 5. P. 653-662.

5. Frese M., Blab H.J. Statistics of damages to timber structures in Germany // Engineering Structures. 2011. Vol. 33, Is. 11. P. 2969-2977.

6. Otero-Chans D., Estévez-Cimadevila J., Martín-Gutiérrez E. Joints with bars glued-in softwood laminated timber subjected to climatic cycles // International Journal of Adhesion and Adhesives. 2018. Vol. 82. P. 27-35.

7. Stoeckel F., Konnerth J., Gindl-Altmutter W. Mechanical properties of adhesives for bonding wood - A review // International Journal of Adhesion and Adhesives. 2013. Vol. 45. P. 32-41.

8. Dietsch P., Winter S. Structural failure in large-span timber structures: A comprehensive analysis of 230 cases // Structural Safety. 2018. Vol. 71. P. 41-46.

9. Fitchin A.A. Development prospects of production of laminated Veneer lumber in Russia // Aktual'nye napravleniya nauchnyh issledovanij XXI veka: teoriya i praktika. 2015. T. 3, № 9-3 (20-3). P. 223-227.

10. Razin'kov E.M. Bond quality of timber in technology of the laminated board for dwelling houses // Forestry Engineering Journal. 2016. T. 6, № 3 (23). P. 127-134.

11. Ovsyannikov S.I., Bogdanov I.I. Peculiarities of technological process of manufacturing of wall glued beam // Visnik Xarkivs'kogo nac. tekhn. un-tu sil's'kogo gospodarstva. 2016. Vip.169. P. 58-63.

12. Mazanik N.V., Bozhelko I.K. Otimization of the bonding mode during the production of composite wooden structures operating under severe conditions // Visnik Xarkivs'kogo nac. tekhn. un-tu sil's'kogo gospodarstva. 2016. Vip.169. P. 30-38.

13. Plotnikova G.P., Simonyan S.H. Development of the adhesive composition for joining solid wood in the conditions of Siberia //Systems Methods Technologies. 2017. № 4 (36). P.169-175.

14. Fedyaev A.A., Fedyaeva N.Yu., Krasnov A.A. Evaluation of the influence of technological factors on the strength of glued beams // Aktual'nye napravleniya nauchnyh issledovanij XXI veka: teoriya i praktika: sb. nauch. tr. VGLU im. G.F. Morozova, 2017. № 5 (31). P. 459-463.

15. Tambi A.A., Chubinskij A.N., Chauzov K.V., Kul'kov A.M. Research of adhesive bond of wood // Forestry Bulletin. 2016. № 2. P. 120-126.

16. Fedyaev A.A., Tankovskaya N.Yu. Substantiation of glue consumption in the production of glued wooden structures // Trudy Bratskogo gosudorstvennogo universiteta. Ser. Estestvennye i inzhenernye nauki. 2013. T. 2. P. 126-129.

17. Technical description. Prefere 6151 [Elektronnyj resurs]. URL: http://prokleim.ucoz.ru/dynea/ Prefere_6151.pdf (data obrashcheniya: 15.06.2018).

18. Frihart C.R. Adhesive groups and how they relate to the durability of bonded wood // Journal of adhesion science and technology. 2009. Vol. 23, № 4. P. 601-617.

19. GOST 33120-2014. Glued timber structures. Methods for determining strength of glue joints. Vved. s 2015-07-01. M.: FGUP «Standartinform», 2014. 18p.

20. GOST 20850-2014. Wooden glued load bearing structures. General specifications. Vved. s 2015-07-01. M.: FGUP «Standartinform», 2014. 14p.