

Научная статья

УДК 674.812

DOI: 10.37482/0536-1036-2023-3-155-161

## Упрочнение и стабилизация форм и размеров древесины осины и тополя карданолом

**В.А. Шамаев**<sup>1</sup>✉, *д-р техн. наук, проф.*; *ResearcherID: Y-9044-2018*,

*ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1762-7956>*

**О.Ф. Шишлов**<sup>2</sup>, *д-р техн. наук, проф., директор по науке и развитию*;

*ResearcherID: Y-4197-2019, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4656-5969>*

<sup>1</sup>Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова, ул. Тимирязева, д. 8, г. Воронеж, Россия, 394036; drevstal@mail.ru✉

<sup>2</sup>ПАО «Уралхимпласт», Северное шоссе, д. 21, г. Нижний Тагил, Свердловская обл., Россия, 622051; o.shishlov@ucp.ru

Поступила в редакцию 19.04.22 / Одобрена после рецензирования 01.08.22 / Принята к печати 06.08.22

**Аннотация.** Наименее востребованными породами в РФ являются осина и тополь, запасы которых постоянно увеличиваются. Для использования в качестве заменителя ценной древесины твердых лиственных пород древесины осины и тополя необходимо увеличить примерно в 2 раза ее прочностные свойства и одновременно достичь стабильности форм и размеров. Наиболее распространенным способом стабилизации форм и размеров древесины является ее обработка уксусным ангидридом, поливиниловым спиртом, полиэтиленгликолем или гидротермическая обработка. Для увеличения прочности древесины применяется обработка феноло- и карбамидоформальдегидными мономерами, олигомерами и смолами. Стабилизация форм и размеров особенно важна для прессованной древесины: ее разбухание в воде в 8 раз превышает разбухание натуральной древесины. В качестве модификатора выбран карданол, получаемый из жидкости скорлупы орехов кешью или синтезированный. Разработана технология пропитки древесины карданолом, содержащим 2–3 % уксусной кислоты, с последующей термообработкой пропитанной древесины при температуре 140–150 °С в течение 6–8 ч. При этом происходит полимеризация карданола с компонентами лигноуглеводного комплекса древесины, что не только улучшает ее свойства, но и придает стабильность форм и размеров в среде с переменной влажностью. Для изучения кинетики использовали дифференциальный сканирующий калориметр Mettler Toledo DSC 823e/700. Измерения тепловых потоков проводили в закрытых стальных тиглях вместимостью 30 мл, способных выдержать давление пара до 15 МПа. На кривой теплового потока при скорости нагрева 10 °С/мин присутствует экзотермический пик с максимумом 150,7 °С. Модифицированная карданолом древесина осины имеет прочность при сжатии вдоль волокон 69 МПа, предельное объемное разбухание 2,6 %, предельное влагопоглощение 18 % при содержании карданола 15 % от массы сухой древесины. Предельное водопоглощение и предельное объемное разбухание древесины, пропитанной карданолом, находятся на одном уровне с соответствующими показателями модифицированной древесины марок Ассожа, Belmadur и Thermowood.

**Ключевые слова:** древесина, прочность древесины, осина, тополь, упрочняющая пропитка, карданол, пропитка карданолом, водопоглощение, влагопоглощение, прочность при сжатии

*Для цитирования:* Шамаев В.А., Шишлов О.Ф. Упрочнение и стабилизация форм и размеров древесины осины и тополя карданолом // Изв. вузов. Лесн. журн. 2023. № 3. С. 155–161. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-3-155-161>

Original article

## Hardening and Stabilization of Volumetric Properties in Aspen and Poplar Wood with Cardanol

*Vladimir A. Shamaev*<sup>1</sup>✉, Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [Y-9044-2018](https://orcid.org/0000-0002-1762-7956),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1762-7956>

*Oleg F. Shishlov*<sup>2</sup>, Doctor of Engineering, Prof., Director for Science Development;

ResearcherID: [Y-4197-2019](https://orcid.org/0000-0002-4656-5969), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4656-5969>

<sup>1</sup>Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, ul. Timiryazeva, 8, Voronezh, 394036, Russian Federation; [drevstal@mail.ru](mailto:drevstal@mail.ru)✉

<sup>2</sup>PJSC “Uralchimplast”, Severnoe sh., 21, Nizhny Tagil, Sverdlovsk region, 622051, Russian Federation; [o.shishlov@ucp.ru](mailto:o.shishlov@ucp.ru)

*Received on April 19, 2022 / Approved after reviewing on August 01, 2022 / Accepted on August 06, 2022*

**Abstract.** Aspen and poplar are the least required types of wood in the Russian Federation, whose stock is continually expanding. Such wood can be used as a substitute for valuable hardwood, but in this case the strength must be almost doubled while achieving stability in shape and size. Treatment with acetic anhydride, polyvinyl alcohol, polyethylene glycol, or hydrothermal care are the most common methods for maintaining the volumetric stability of the wood. Treatment with phenol- and urea-formaldehyde monomers, oligomers, and resins is typically done for strength improvement. The stabilization of the dimensional parameters is especially critical for pressed wood, which has 8 times greater swelling in water than raw wood. Cardanol was chosen as a modifier. It can be derived from cashew nutshell liquid or synthesized. The established technique for impregnating wood with cardanol includes 2–3 % acetic acid, followed by heat treatment at 140–150 °C for 6–8 hours. During this process, cardanol polymerizes with components of the lignocarbhydrate complex of the wood, which does not only improve its characteristics but also provides form and size stability in an environment with changeable humidity. A Mettler Toledo DSC 823e/700 differential scanning calorimeter was used to examine the kinetics. Heat fluxes were measured in 30 µl sealed steel crucibles that could sustain steam pressure up to 15 MPa. At a heating rate of 10 °C/min, the heat flow curve showed an exothermic peak with a maximum temperature of 150.7 °C. Aspen wood with 15 % cardanol content has a compressive strength along the fibers of 69 MPa, a volume swelling limit of 2.6 %, and a moisture absorption limit of 18 %. The ultimate water absorption and ultimate volumetric swelling of wood impregnated with cardanol are comparable to the relevant indications of the modified wood brands Accoja, Belmadur, and Thermowood.

**Keywords:** wood, wood strength, aspen, poplar, hardening impregnation, cardanol, cardanol impregnation, water absorption, moisture absorption, compressive strength

**For citation:** Shamaev V.A., Shishlov O.F. Hardening and Stabilization of Volumetric Properties in Aspen and Poplar Wood with Cardanol. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2023, no. 3, pp. 155–161. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-3-155-161>



*Введение*

В Российской Федерации хвойные леса после вырубki зарастают осиной и тополем, реже березой. При лесозаготовках бóльшая часть древесины осины и тополя остается гнить на лесосеках, так как древесина этих пород не находит широкого применения из-за низкой прочности и склонности к загниванию. Наиболее распространенным способом стабилизации форм и размеров древесины является ее обработка уксусным ангидридом, поливиниловым спиртом, полиэтиленгликолем [4, 6, 8] или гидротермическая обработка [5, 19]. Но данные способы не позволяют увеличить прочность древесины. Для этого применяется обработка феноло- и карбамидоформальдегидными мономерами, олигомерами и смолами [9, 10, 14]. Однако эти способы высоко токсичны, получаемая модифицированная древесина также характеризуется токсичностью.

В последнее время взамен карбамидоформальдегидных и фенолоформальдегидных смол в производстве плитных материалов (ДСтП, ДВП, МДФ, ОСП) используется карданол, получаемый из жидкости скорлупы орехов кешью или синтезированный [2, 7, 11]. Карданол является нетоксичным органикорастворимым олигомером, в кислой среде он полимеризуется, образуя 3-мерную сетку (рис. 1). Поскольку при полимеризации присутствуют активные гидроксильные группы и двойные связи, велика вероятность «сшивки» образующегося полимера с активными группами компонентов древесины, что увеличит формостабильность модифицированной древесины даже при малом содержании в ней карданолола [1, 3, 12, 15].

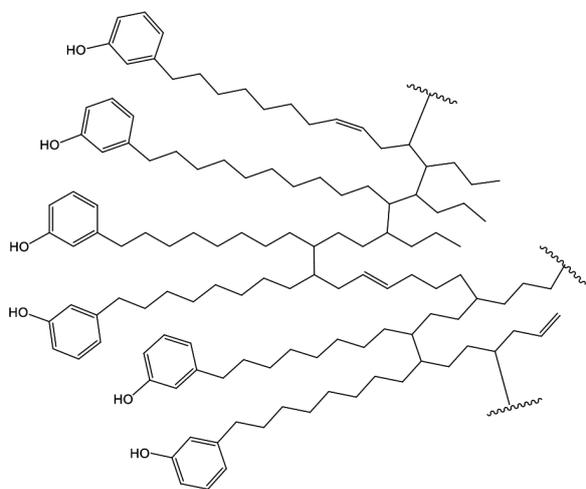


Рис. 1. Фрагмент структуры продукта полимеризации карданолола

Fig. 1. Fragment of cardanol polymerization product structure

*Объекты и методы исследования*

Изучена катионная полимеризация карданолола, катализируемая ледяной уксусной кислотой в количестве 3 % от массы карданолола. Для исследования кинетики использовали дифференциальный сканирующий калориметр Mettler Toledo DSC 823e/700. Измерения тепловых потоков проводили в закрытых стальных тиглях вместимостью 30 мкл, выдерживающих давление пара до 15 МПа. Динамические ДСК-измерения (ДСК – дифференциальная сканирующая калориметрия) осуществляли при скоростях нагрева 5, 10 и

20 °С/мин в диапазоне температур от 25 до 250 °С. Масса навесок образцов была в пределах 4–6 мг. Кинетические расчеты выполняли по известным алгоритмам [1, 12, 13, 18].

В качестве сырья использовали древесину тополя и осины *Populus tremula* L. плотностью соответственно 390 и 495 кг/м<sup>3</sup> в виде брусков размерами 30×120×200 мм (последний размер – вдоль волокон) и влажностью 12 %. Раствор карданола готовили путем добавления в него 3%-й ледяной уксусной кислоты. В качестве контроля использовали стандартную фенолоформальдегидную смолу СФЖ-3016 [17].

Образцы загружали в лабораторный автоклав емкостью 10 л, куда с избытком заливали модифицирующий раствор, подогретый до 65 °С. Пропитку древесины проводили при давлении 15 атм в течение 3 мин, после чего давление сбрасывали до атмосферного, далее следовала выдержка 15 мин и процесс повторяли.

Пропитанные бруски высушивали в термощкафу при температуре 90 °С в течение 8 ч до влажности 6 % и подвергали термообработке при температуре 140–170 °С в течение 4–8 ч (при 170 °С – 4 ч, при 140 °С – 8 ч). После этого из брусков изготавливали образцы 15×15×22,5 мм (последний размер – вдоль волокон), которые испытывали на водо- и влагопоглощение, линейное и объемное разбухание, предел прочности при сжатии вдоль волокон, статическую твердость по ГОСТ 25579–83, ГОСТ 21573.5–77, ГОСТ 21523.6–77, ГОСТ Р 54577 54577–2011, ГОСТ Р 55657–2013. Для каждой серии использовали 8 образцов. Результаты эксперимента обрабатывали методом вариационной статистики [16].

#### Результаты исследования и их обсуждение

На рис. 2 представлена зависимость продолжительности протекания реакции полимеризации карданола в присутствии катализатора – уксусной кислоты – от температуры и степени превращения  $\alpha$ . На кривой ДСК при скорости нагрева 10 °С/мин присутствует экзотермический пик с максимумом 150,7 °С. На основании полученных данных можно рекомендовать проведение реакции полимеризации карданола в процессе производства модифицированной древесины при температуре от 150 °С.

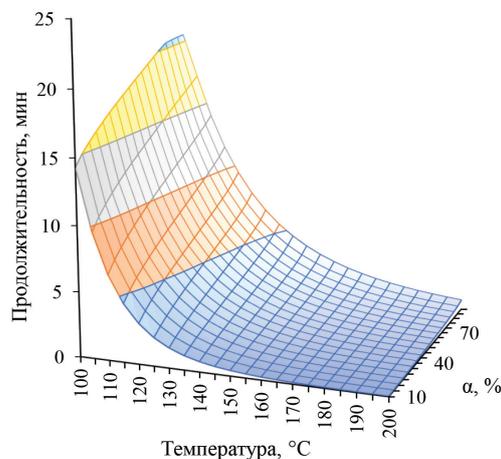


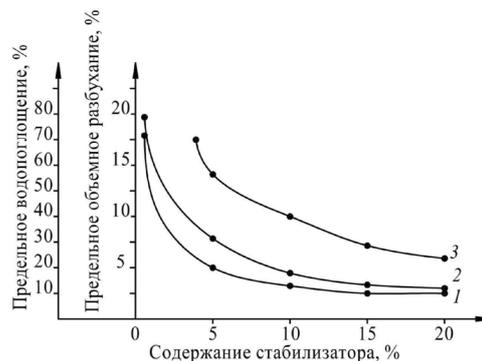
Рис. 2. Зависимость продолжительности реакции полимеризации карданола в присутствии катализатора – уксусной кислоты – от температуры и степени превращения

Fig. 2. The surface dependence of cardanol polymerization reaction time on the temperature and degree of conversion  $\alpha$  in the presence of a catalyst (acetic acid)

Сравнение ИК-спектров карданола и продуктов реакции его олигомеризации указывает на снижение количества двойных связей в  $C_{15}$ -заместителе, что подтверждает протекание полимеризации карданола через раскрытие двойных связей в боковой цепи с образованием олигомерного продукта (рис. 1).

Предельное объемное разбухание и предельное водопоглощение модифицированной древесины функционально зависят от содержания карданола или фенолоформальдегидной смолы СФЖ-3016 (рис. 3). Как видно из рис. 3, оптимальное содержание стабилизатора составляет 15 % от массы сухой древесины. Дальнейшее увеличение содержания стабилизатора незначительно снижает водопоглощение и объемное разбухание.

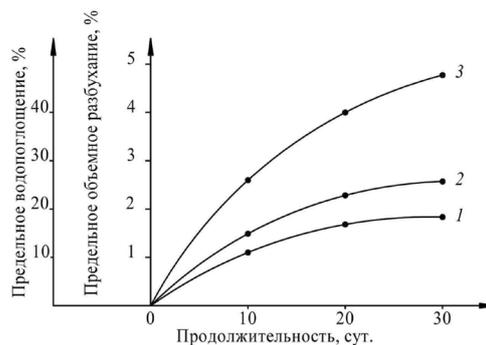
Рис. 3. Зависимость для древесины осины: 1, 2 – соответственно предельного объемного разбухания и предельного водопоглощения от содержания карданола; 3 – предельного объемного разбухания от содержания фенолоформальдегидной смолы СФЖ-3016



На рис. 4 показана кинетика объемного разбухания и водопоглощения древесины, пропитанной карданолом и СФЖ-3016, во времени при содержании стабилизатора 15 % от массы сухой древесины. Предельное объемное разбухание и предельное водопоглощение древесины, пропитанной карданолом, как показывает рис. 4, находятся на одном уровне с соответствующими показателями модифицированной древесины марок Ассожа, Belmadur и Thermowood. Интересно отметить, что при влагопоглощении предельное объемное разбухание древесины осины, стабилизированной карданолом, составляет 2 %, а предельное водопоглощение – 10 %.

Рис. 4. Зависимость от продолжительности пребывания в воде: 1, 2 – соответственно предельного водопоглощения и предельного объемного разбухания древесины осины, пропитанной карданолом; 3 – предельного объемного разбухания древесины, пропитанной смолой СФЖ-3016

Fig. 4. Dependence for impregnated aspen wood on time spent in water: 1, 2 – of ultimate water absorption and ultimate volumetric swelling of wood with cardanol content, respectively; 3 – of ultimate volumetric swelling of wood with phenol-formaldehyde resin PPLR-3016



Пропитка древесины осины и тополя существенно улучшает прочностные свойства древесины. В таблице приведены прочностные показатели древесины осины и тополя, содержащей 15 % карданола от массы сухой древесины.

**Прочностные показатели древесины осины и тополя**  
**The strength characteristics of aspen and poplar woods**

Показатель	Числовые значения показателя при влажности древесины 6 %			
	осина		тополь	
	натуральная	модифицированная	натуральная	модифицированная
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	500	590	370	430
Предел прочности при сжатии вдоль волокон, МПа	46	69	43	61
Ударная вязкость, Дж/см <sup>2</sup>	8,7	13,3	4,1	11,0
Твердость торцовая, Н/мм <sup>2</sup>	26,3	40,9	26,7	42,2

Как видно из таблицы, после пропитки древесины карданолом ее плотность увеличивается на 15 %, а прочностные показатели – в 1,5–1,8 раза, и по этим показателям модифицированная древесина осины и тополя соответствует древесине бука, т. е. ее свойства приближаются к свойствам древесины твердых лиственных пород.

*Выводы*

1. Пропитка древесины осины и тополя карданолом и последующая термообработка приводят к образованию нового древеснополимерного материала – модифицированной древесины с оптимальным содержанием карданола 15 %.

2. Модифицированная карданолом древесина осины отличается низкими показателями предельного водопоглощения (18 %) и предельного объемного разбухания (2,6 %).

3. После обработки древесины осины и тополя карданолом плотность материала увеличивается на 15 %, а предел прочности при сжатии – в 1,5–1,8 раза, что соответствует прочностным показателям древесины бука.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Патент № 2131351 С1 РФ, МПК В27К 3/50 (1995.01). Способ получения модифицированной древесины: № 97118641/04: заявл. 19.11.1997: опубл. 10.06.1999 / В.И. Ткаченко, Д.В. Канцелярист, О.А. Шамаев, В.А. Шамаев, В.Ф. Суранов, Е.В. Облонский, В.В. Канцелярист.

Tkachenko V.I., Kancelyarist D.V., Shamaev O.A., Shamaev V.A., Suranov V.F., Oblonskij E.V., Kancelyarist V.V. *Modified Wood Manufacture Method*. Patent RF, no. RU 2131351, 1999. (In Russ.).

2. Шамаев В.А. Получение модифицированной древесины химико-механическим способом и исследование ее свойств // Лесотехн. журн. 2015. Т. 5, № 4(20). С. 177–187.

Shamaev V.A. Receiving Modified Wood Chemi-Mechanical Process and Investigation of Its Properties. *Lesotexnicheskij zhurnal = Forestry Engineering Journal*, 2015, vol. 5, no. 4(20), pp. 177–187. (In Russ.). <https://doi.org/10.12737/17421>

3. Шамаев В.А., Златоустовская В.В., Копытин А.С. Стабилизация форм и размеров прессованной древесины химическими методами // Изв. вузов. Лесн. журн. 2010. № 2. С. 115–121.

Shamaev V.A., Zlatoustovskaya V.V., Kopytin A.S. Stabilization of Forms and Dimensions of Pressed Wood by Chemical Methods. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2010, no. 2, pp. 115–121. (In Russ.). <http://lesnoizhurnal.ru/upload/iblock/c0a/c0a8e4d78e32d56f8e33156dcb78c9d7.pdf>

4. ACCOYA. Official website. Available at: <https://www.accoya.com/why-accoya/benefits/> (accessed 12.07.22).
5. Deka M., Saikia C.N. Chemical Modification of Wood with Thermosetting Resin: Effect on Dimensional Stability and Strength Property. *Bioresource Technology*, 2000, vol. 73, no. 2, pp. 179–181. [https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(99\)00167-4](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(99)00167-4)
6. Gry A., Westin M. Durability of Modified Wood – Laboratory vs Field Performance. *Proceedings of the Fourth European Conference on Wood Modification*. Sweden, SP Technical Research Institute Publ., 2009, pp. 515–522.
7. Igaz R., Macek Š., Zemiari J. The Influence of Unidirectional Cyclic Bend Loading on Initial Relaxation Speed of Beech Lamellas. *Acta Facultatis Xylogologiae Zvolen*, 2014, vol. 56, pp. 27–35.
8. KEBONY. Official website. Available at: <https://us.kebony.com/> (accessed 12.07.22).
9. Kúdela J., Rešetka M. Influence of Pressing Parameters on Dimensional Stability and Density of Compressed Beech Wood. *European Journal of Wood and Wood Products*, 2018, vol. 76, no. 4, pp. 1241–1252. <https://doi.org/10.1007/s00107-018-1298-8>
10. Lekounougou S., Kocafe D., Oumarou N., Kocafe Y., Poncsak S. Effect of Thermal Modification on Mechanical Properties of Canadian White Birch (*Betula papyrifera*). *International Wood Products Journal*, 2011, vol. 2, no. 2, pp. 101–107. <https://doi.org/10.1179/2042645311Y.0000000016>
11. Papadopoulos A., Mantanis G. Vapour Sorption Studies of Belmadur Wood. *Advances in Forestry Letter (AFL)*, 2012, vol. 1, iss. 1, pp. 1–6.
12. Polilov A.N., Dornyak O.R., Shamaev V.A., Rumachik M.M. Justification of the Production Process of Pressed Wood and Study of Its Properties. *Mechanics of Composite Materials*, 2018, vol. 54, no. 2, pp. 221–230. <https://doi.org/10.1007/s11029-018-9733-9>
13. Risfaheri R., Tun T., Nur M., Saillah I. Isolation of Cardanol from Cashew Nutshell Liquid Using the Vacuum Distillation Method. *Indonesian Journal of Agriculture*, 2009, no. 2, pp. 11–20.
14. Sandberg D., Haller P., Navi P. Thermo-Hydro and Thermo-Hydro-Mechanical Wood Processing: An Opportunity for Future Environmentally Friendly Wood Products. *Wood Material Science and Engineering*, 2013, vol. 8, no. 1, pp. 64–88. <https://doi.org/10.8017480272.2012.751935>
15. Shamaev V.A., Medvedev I.N., Parinov D.A. Study of Modified Wood as a Bearing Material for Machine-Building. *Proceedings of the International Conference “Aviamechanical Engineering and Transport”*, AVENT, 2018. Atlantis Press Publ., 2018, pp. 478–482. <https://doi.org/10.2991/avent-18.2018.92>
16. Shamaev V.A., Medvedev I.N., Parinov D.A. Changing Wood Texture with Combination of Selective Treatment and Pressing. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, IOP Publ., 2021, vol. 875, no. 1, pp. 1–7. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/875/1/012057>
17. Shamaev V.A., Medvedev I.N., Parinov D.A., Shakirova O.I., Anisimov M.V. Investigation of Modified Wood as a Material Power Transmission Pole Produced by Self-Pressing Method. *Acta Facultatis Xylogologiae Zvolen*, 2018, vol. 60, no. 2, pp. 25–32. <https://doi.org/10.17423/afx.2018.60.2.02>
18. Tyman J.H., Kiong L.S. Long Chain Phenols: Part XI. Composition of Natural Cashew Nutshell Liquid (*Anacardium occidentale*) from Various Sources. *Lipids*, 1978, vol. 13, no. 8, pp. 525–532. <https://doi.org/10.1007/BF02533591>
19. Zhenhua G., Dong L. Chemical Modification of Poplar Wood with Foaming Polyurethane Resins. *Journal of Applied Polymer Science*, 2007, vol. 104, no. 5, pp. 2980–2985. <https://doi.org/10.1002/app.25963>

**Конфликт интересов:** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов  
**Conflict of interest:** The authors declare that there is no conflict of interest

**Вклад авторов:** Все авторы в равной доле участвовали в написании статьи  
**Authors' Contribution:** All authors contributed equally to the writing of the article