

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

УДК 531.75.06

DOI:10.18324/2077-5415-2019-4-66-71

Математическая модель пропитки древесины под действием гидростатического давления жидкости в резервуаре

В.В. Неслухов^a, А.Р. Бирман^b, Е.Г. Хитров^c, С.А. Угрюмов^d

Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет им. С.М. Кирова, Институтский пер., 5, Санкт-Петербург, Россия

^a nesluhov9325@yandex.ru, ^b birman1947@mail.ru, ^c yegorkhitrov@gmail.com, ^d ugr-s@yandex.ru

^a <https://orcid.org/0000-0002-6621-4250>,

^b <https://orcid.org/0000-0002-1693-0515>,

^c <https://orcid.org/0000-0003-4569-9508>,

^d <https://orcid.org/0000-0002-8077-3542>

Статья поступила 14.10.2019, принята 04.11.2019

В настоящее время широко применяются различные методы повышения эксплуатационных свойств древесины. Одним из таких методов является пропитка. На крупных деревообрабатывающих заводах широко используются ванны для септирования и автоклавы для импрегнации продукции. Чаще всего эти агрегаты применяются для повышения срока службы изделий из древесины, однако их использование требует значительных энергозатрат, что делает продукцию менее конкурентоспособной. Вдобавок, эти агрегаты необходимо обслуживать, обучать персонал, что также влечет за собой ряд трудностей. Поэтому для небольших предприятий можно предложить другие методы, в том числе пропитку древесины под воздействием гидростатического давления. В данной статье рассмотрена математическая модель пропитки древесины под воздействием гидростатического давления. Рассчитано время пропитки для основных заготавливаемых пород северо-западного региона — осины, березы, ели, сосны, ольхи; предложены две компоновки установок для пропитки древесины под воздействием гидростатического давления. Данное направление можно считать перспективным, поскольку оно имеет такие неоспоримые плюсы, как низкая цена проводимых операций, простота установки и обслуживания, а также минимальные затраты на подготовку сырья и получение качественного конечного продукта.

Ключевые слова: пропитка древесины; гидростатическое давление; линейный закон фильтрации Дарси; режимы пропитки заготовок.

Mathematical model of wood impregnation under the influence of hydrostatic pressure of liquid in the tank

V.V. Neslukhov^a, A.R. Birman^b, E.G. Khitrov^c, S.A. Ugryumov^d

St. Petersburg State Forest Technical University; 5, Institutskiy Per., St. Petersburg, Russia

^a nesluhov9325@yandex.ru, ^b birman1947@mail.ru, ^c yegorkhitrov@gmail.com, ^d ugr-s@yandex.ru

^a <https://orcid.org/0000-0002-6621-4250>,

^b <https://orcid.org/0000-0002-1693-0515>,

^c <https://orcid.org/0000-0003-4569-9508>,

^d <https://orcid.org/0000-0002-8077-3542>

Received 14.10.2019, accepted 04.11.2019

Currently, various methods of improving the performance of wood are widely used. One of these methods is the impregnation of wood. In large wood processing plants, septic tanks and autoclaves are widely used to impregnate wood products. Most often these units are used to increase the service life of wood products. However, the use of such units entails significant energy costs, which makes the products less competitive in the market of wooden products. In addition, these units need to be maintained, the personnel must be trained, which also carries a number of difficulties. Therefore, other methods of wood impregnation, including wood impregnation under the influence of hydrostatic pressure, can be offered for small enterprises. In this article the mathematical model of impregnation of wood under the influence of hydrostatic pressure is considered. The impregnation time for the main harvested species of the North-Western region is calculated: aspen, birch, spruce, pine, alder. Also, two layouts of installations for impregnation of wood under the influence of hydrostatic pressure are offered. This direction can be considered promising, it has such undeniable advantages, such as: low cost of operations, ease of installation and ease of maintenance. This direction of wood impregnation has prospects of development with obtaining high-quality products while minimizing the cost of preparing raw materials and obtaining the final product.

Keywords: wood impregnation; hydrostatic pressure; Darcy linear filtering law; modes of wood impregnation.

Таблица 1

Экспериментальные значения коэффициента проницаемости при пропитке древесины березы, осины, ольхи, сосны и ели

Порода древесины	$k, 10^{13} \text{ м}^2$	$S, 10^{13} \text{ м}^2$	$\Delta, 10^{13} \text{ м}^2$
Береза	1,303	0,0684	0,140
Осина	1,392	0,0939	0,192
Ольха	1,348	0,0817	0,167
Сосна	1,050	0,1406	0,225
Ель	1,227	0,1744	0,279

Введение. Операция пропитки широко применяется для повышения эксплуатационных свойств древесины [1–4]. При этом обработка крупномерных древесных заготовок по традиционным технологиям пропитки сопряжена с использованием дорогостоящего крупногабаритного оборудования [5; 6]. В настоящее время наиболее актуальна разработка методов пропитки древесины, отличающихся простотой конструктивного исполнения и низкой энергоемкостью установок [7–10]. В рамках данной работы предлагается способ пропитки древесины за счет действия гидростатического давления путем выдержки древесины в специальных резервуарах.

Теоретические основы пропитки древесины за счет действия гидростатического давления. Для составления математической модели пропитки древесины под воздействием гидростатического давления пропиточной жидкости в резервуаре примем расчетную схему, представленную на рис. 1.

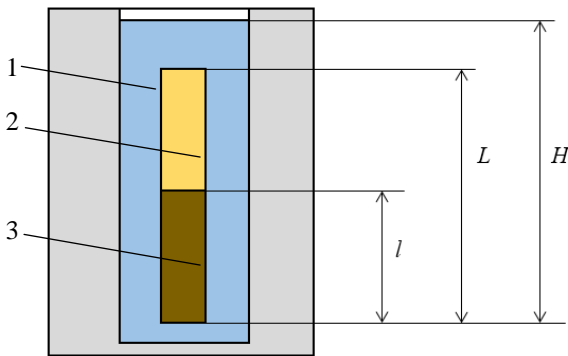


Рис. 1. Расчетная схема процесса пропитки заготовки под действием гидростатического давления: 1 — пропиточная жидкость; 2 — не пропитанная часть заготовки; 3 — пропитанная часть заготовки; l — высота пропитки; L — длина заготовки; H — уровень жидкости

Скорость фронта пропитки заготовки под действием гидростатического давления определим на основании линейного закона фильтрации Дарси [11; 12]:

$$\frac{dl}{dt} = \frac{k \Delta p}{\mu l}, \quad (1)$$

где l — положение фронта пропитки относительно нижнего торца заготовки, погруженной в резервуар с пропиточной жидкостью; t — время пропитки; k — коэффициент проницаемости; μ — вязкость пропиточной жидкости; Δp — градиент давления пропиточной жидкости по длине заготовки.

Коэффициент проницаемости k является величиной, определяемой экспериментально, его значение зависит от породы древесины [13; 14]. Значения коэффициента проницаемости k для древесины березы, осины, ольхи, сосны и ели, определенные по рекомендациям [15; 16], представлены в табл. 1 со следующими обозначениями: S — среднеквадратическое отклонение экспериментальной величины; Δ — доверительный интервал изменения экспериментальной величины.

Градиент Δp определим с учетом гидростатического давления и внутреннего давления в порах и капиллярах заготовки:

$$\Delta p = p_0 + \rho g H - \rho g l, \quad (2)$$

где p_0 — внутреннее давление в порах и капиллярах, обусловленное действием капиллярных сил, давления заземленного воздуха и т. д., не зависящее от гидростатического давления пропиточной жидкости; ρ — плотность пропиточной жидкости; g — ускорение свободного падения; H — напор пропиточной жидкости (равен глубине погружения нижнего торца заготовки в резервуар с пропиточной жидкостью согласно рис. 1).

Подставим выражение для градиента давления (2) в уравнение скорости фронта пропитки (1), тогда:

$$\frac{dl}{dt} = \frac{k}{\mu} \frac{p_0 + \rho g H - \rho g l}{l}. \quad (3)$$

Начальное условие к решению дифференциального уравнения (3) имеет вид:

$$l(0) = 0. \quad (4)$$

Решение уравнения (3) при начальном условии (4) получим в следующем виде:

$$l = \frac{\rho g H + p_0}{\rho g} \left(1 + W \left(-\exp \left(-\frac{\mu(\rho g H + p_0) + k \rho^2 g^2 t}{\mu(\rho g H + p_0)} \right) \right) \right), \quad (5)$$

где $W(\dots)$ — специальная функция W -функция Ламберта, определяемая выражением [17; 18]:

$$W(\xi) \exp(W(\xi)) = \xi, \quad (6)$$

где ξ — аргумент W -функции, в нашем случае:

$$W \left(-\exp \left(-\frac{\mu(\rho g H + p_0) + k \rho^2 g^2 t}{\mu(\rho g H + p_0)} \right) \right) \exp \left(W \left(-\exp \left(-\frac{\mu(\rho g H + p_0) + k \rho^2 g^2 t}{\mu(\rho g H + p_0)} \right) \right) \right) = -\exp \left(-\frac{\mu(\rho g H + p_0) + k \rho^2 g^2 t}{\mu(\rho g H + p_0)} \right). \quad (7)$$

Специальная W -функция не имеет точного представления в элементарных функциях, однако приближенно может быть разложена в ряд Тейлора по аргументу t :

$$W \left(-\exp \left(-\frac{\mu(\rho g H + p_0) + k \rho^2 g^2 t}{\mu(\rho g H + p_0)} \right) \right) \approx$$

$$\begin{aligned}
 & -1 + \sqrt{\frac{2k\rho^2 g^2}{\mu(\rho g H + p_0)}} \sqrt{t} - \frac{1}{3} \frac{2k\rho^2 g^2}{\mu(\rho g H + p_0)} t + \\
 & + \frac{1}{36} \sqrt{\left(\frac{2k\rho^2 g^2}{\mu(\rho g H + p_0)}\right)^3} \sqrt{t^3} - \\
 & - \frac{1}{270} \left(\frac{2k\rho^2 g^2}{\mu(\rho g H + p_0)}\right)^2 t^2 + \dots
 \end{aligned} \quad (8)$$

Подставим выражение (8) в решение (5), тогда положение фронта пропитки будет:

$$\begin{aligned}
 l = & \frac{\rho g H + p_0}{\rho g} \left(\sqrt{\frac{2k\rho^2 g^2}{\mu(\rho g H + p_0)}} \sqrt{t} - \frac{1}{3} \frac{2k\rho^2 g^2}{\mu(\rho g H + p_0)} t + \right. \\
 & + \frac{1}{36} \sqrt{\left(\frac{2k\rho^2 g^2}{\mu(\rho g H + p_0)}\right)^3} \sqrt{t^3} - \\
 & \left. - \frac{1}{270} \left(\frac{2k\rho^2 g^2}{\mu(\rho g H + p_0)}\right)^2 t^2 + \dots \right)
 \end{aligned} \quad (9)$$

Расчеты показывают, что в диапазонах изменения переменных, характерных для решаемой задачи, в разложении (8) можем без существенной потери точности ограничиться тремя первыми членами ряда, тогда:

$$\begin{aligned}
 W \left(-\exp \left(-\frac{\mu(\rho g H + p_0) + k\rho^2 g^2 t}{\mu(\rho g H + p_0)} \right) \right) \approx \\
 -1 + \sqrt{\frac{2k\rho^2 g^2}{\mu(\rho g H + p_0)}} \sqrt{t} - \frac{1}{3} \frac{2k\rho^2 g^2}{\mu(\rho g H + p_0)} t
 \end{aligned} \quad (10)$$

$$l = \frac{\rho g H + p_0}{\rho g} \left(\sqrt{\frac{2k\rho^2 g^2}{\mu(\rho g H + p_0)}} \sqrt{t} - \frac{1}{3} \frac{2k\rho^2 g^2}{\mu(\rho g H + p_0)} t \right) \quad (11)$$

После алгебраических преобразований получим более простую форму записи уравнения (11):

$$l = \sqrt{\frac{2k(\rho g H + p_0)}{\mu}} \sqrt{t} - \frac{2k\rho g}{3\mu} t \quad (12)$$

По формуле (12) можем выразить время, за которое фронт пропитки достигнет положения l :

$$t = \frac{9\mu}{4\rho^2 g^2 k} \left(\left(\rho g H + p_0 - \frac{2}{3} \rho g l \right) - \sqrt{\left(\rho g H + p_0 - \frac{4}{3} \rho g l \right)} \right) \quad (13)$$

Решив уравнение (12) относительно H , получим выражение для напора (требуемой глубины погружения нижнего торца заготовки в резервуар) в зависимости от заданной глубины пропитки и времени:

$$H = \frac{2k\rho g}{9\mu} t + \frac{2}{3} l + \frac{\mu}{2k\rho g} \frac{l^2}{t} - \frac{p_0}{\rho g} \quad (14)$$

Уравнения (12)–(14) позволяют проводить расчет времени и глубины пропитки заготовок древесины под действием гидростатического давления при варьировании плотности и вязкости пропиточной жидко-

сти, длины заготовки и глубины ее погружения в резервуар с пропиточной жидкостью. Порода древесины учитывается коэффициентом проницаемости и значением дополнительного давления, обусловленного действием капиллярных сил и эффектом защемленного воздуха, не зависящим от градиента гидростатического давления.

Расчет времени пропитки древесины на основе разработанных математических моделей. Приведем примеры расчета времени пропитки заготовок древесины различных пород. Используем следующие исходные данные: $\rho = 1\,000 \text{ кг/м}^3$, $\mu = 0,002 \text{ Па}\cdot\text{с}$, $p_0 = 0$, коэффициент k определен по табл. 1 в зависимости от породы древесины. Результаты представлены в виде графиков на рис. 2–6 и в табл. 2. На графиках сплошной линией показана верхняя граница прогнозируемого времени пропитки, пунктирной — нижняя граница.

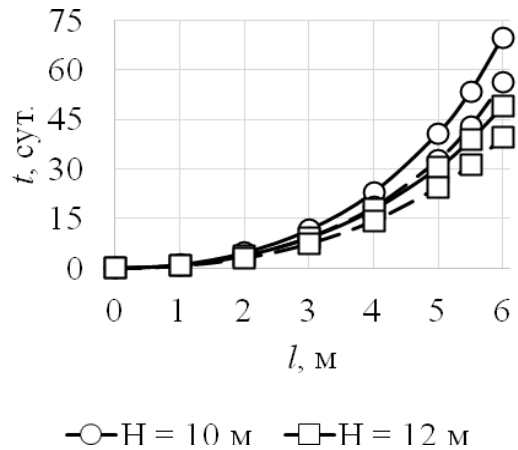


Рис. 2. Расчетное время пропитки заготовок древесины березы под действием гидростатического давления пропиточной жидкости в резервуаре

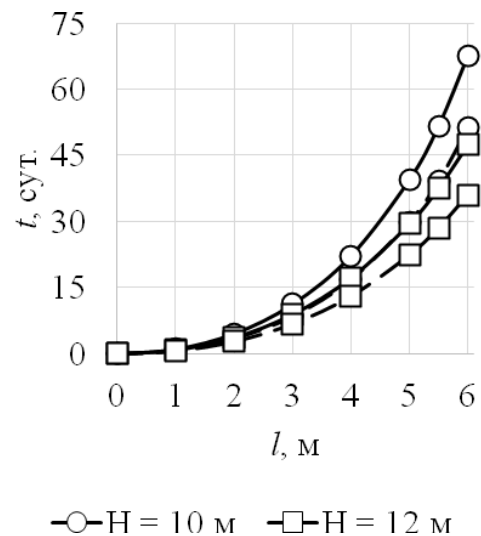


Рис. 3. Расчетное время пропитки заготовок древесины осины под действием гидростатического давления пропиточной жидкости в резервуаре

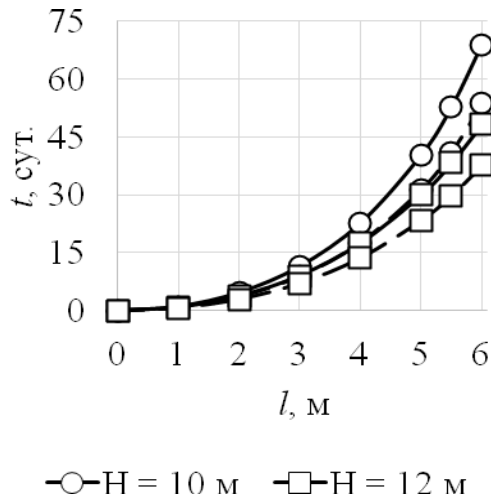


Рис. 4. Расчетное время пропитки заготовок древесины ольхи под действием гидростатического давления пропиточной жидкости в резервуаре

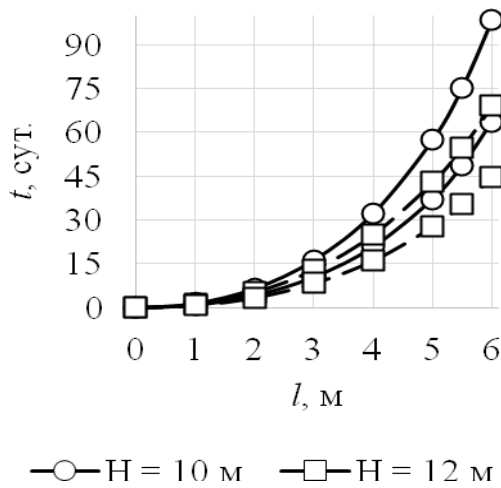


Рис. 5. Расчетное время пропитки заготовок древесины сосны под действием гидростатического давления пропиточной жидкости в резервуаре

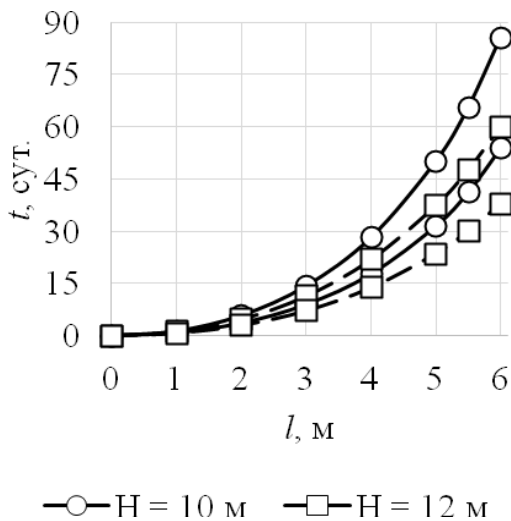


Рис. 6. Расчетное время пропитки заготовок древесины ели под действием гидростатического давления пропиточной жидкости в резервуаре

Таблица 2
Расчетное время пропитки заготовок различных пород древесины под действием гидростатического давления пропиточной жидкости в резервуаре (пропитка на глубину 5 м / пропитка на глубину 6 м)

Порода древесины	H = 8 м	H = 10 м	H = 12 м
Береза	<u>52–64</u> 147–183	<u>33–41</u> 56–70	<u>25–30</u> 39–49
Ольха	<u>47–62</u> 134–177	<u>30–40</u> 51–68	<u>22–29</u> 36–47
Осина	<u>49–63</u> 140–180	<u>31–40</u> 54–69	<u>23–30</u> 38–48
Сосна	<u>58–90</u> 167–257	<u>37–57</u> 64–98	<u>28–43</u> 45–69
Ель	<u>49–78</u> 141–224	<u>31–50</u> 54–86	<u>24–37</u> 38–60

Таблица 3
Глубина погружения нижнего торца заготовок древесины длиной 6 м в зависимости от требуемого времени пропитки

Порода древесины	t = 15 суток	t = 30 суток
Береза	24–29	14–17
Ольха	22–28	13–16
Осина	23–28	14–16
Сосна	26–38	15–21
Ель	23–34	14–19

Таким образом, результаты расчетов показывают, что при заданном времени пропитки, 15 суток, нижние торцы заготовок длиной 6 м следует размещать в пропиточном резервуаре на глубине 20–40 м, в зависимости от породы древесины, при времени пропитки 30 суток — на глубине 15–20 м. Альтернативный вариант заключается в монтаже дополнительного вертикального напорного патрубка в пропиточном резервуаре, в котором столб жидкости будет увеличивать гидростатическое давление пропиточной жидкости (рис. 7).

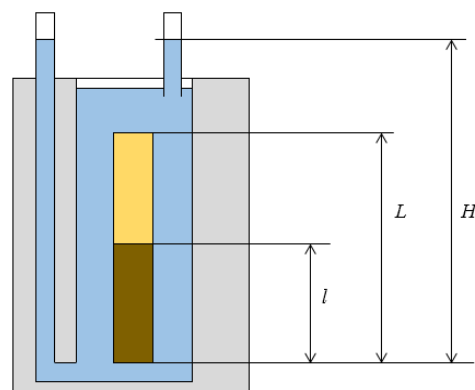


Рис. 7. Установки для пропитки заготовок древесины с дополнительным вертикальным напорным патрубком

Вывод. Таким образом, предлагаемый метод пропитки древесины под действием гидростатического давления жидкости в резервуаре позволяет снизить энергозатраты на осуществление процесса сквозной пропитки круглых лесоматериалов.

Литература

1. Бирман А.Р., Кривоногова А.С. Использование методов пропитки длинномерных сортиментов сырья // Вестн. Нижневарт. гос. ун-та. 2015. № 1. С. 45–48.
2. Кривоногова А.С., Бирман А.Р. Анализ использования способов пропитки в технологии производства древесного угля // Современный научный вестник. Белгород, 2013. Т. 9, № 2. С. 21–28.
3. Кривоногова А.С., Бирман А.Р. Пропитка капиллярно-пористых структур встречно-центробежным способом / ВГЛТУ // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика: сб. тр. по материалам междунар. заоч. науч.-практической конф. Воронеж, 2015. № 2, ч. 1. С. 236–240.
4. Патякин В.И., Тишин Ю.Г., Базаров С.М. Техническая гидродинамика древесины. М.: Лесная промышленность, 1990. 304 с.
5. Расев А.И., Косарин А.А., Красухина Л.П. Технология и оборудование защитной обработки древесины. М.: МГУЛ, 2010. 171 с.
6. Бирман А.Р., Кривоногова А.С., Соколова В.А., Нгуен Ван Тоан. Технологическое устройство для пропитки капиллярно-пористых тел / ВоГУ // Актуальные проблемы развития лесного комплекса: сб. ст. Вологда, 2017. С. 99–101.
7. Кривоногова А.С., Бирман А.Р., Нгуен Ван Тоан. Актуальность разработки модели установки для пропитки капиллярно-пористых тел // Инновационные процессы в научной среде: сб. ст. междунар. науч.-практической конф. Уфа, 2016. С. 54–56.
8. Кривоногова А.С., Бирман А.Р. Использование эффективности метода гидростатического давления пропиточной жидкости при повышении качественных характеристик лесоматериалов // Современный научный вестник. 2013. Т. 9, № 1. С. 3–10.
9. Кривоногова А.С., Бирман А.Р., Нгуен Ван Тоан. Разработка экспериментального технологического устройства для пропитки капиллярно-пористых тел // Инновационные механизмы решения проблем научного развития: сб. ст. междунар. науч.-практической конф. Уфа, 2016. С. 63–65.
10. Соколова В.А., Кривоногова А.С., Нгуен Ван Тоан, Бирман А.Р. Актуализация установки для пропитки капиллярно-пористых тел / СПбПУ Петра Великого // Труды ин-та ландшафтной архитектуры, строительства и обработки древесины. СПб., 2016. С. 4–5.
11. Кривоногова А.С. Математическая модель процесса пропитки капиллярно-пористых структур водными растворами пероксида // Научное обозрение. 2015. № 7. С. 251–256.
12. Бирман А.Р., Кривоногова А.С., Соколова В.А. Определение коэффициента фильтрации и параметров процесса пропитки древесных углей в поле центробежных сил // Научное обозрение. 2015. № 7. С. 238–243.
13. Гончаров Ю.А. Влияние особенностей строения древесины и физико-химических свойств импрегната на эффективность пропитки древесины в поле центробежных сил: дис. ... канд. техн. наук. Петрозаводск, 2015. 121 с.
14. Бирман А.Р., Соколова В.А., Кривоногова А.С. Пропитка древесины гидростатическим способом / ВГЛТУ // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика: сб. науч. тр. Воронеж, 2014. № 5. С. 33–38.
15. Есин Г.Ю. Совершенствование технологии пропитки лиственных и тонкомерных хвойных лесоматериалов: дис. ... канд. техн. наук. Архангельск, 2013. 178 с.
16. Corless R.M., Gonnet G.H., Hare D.E.G., Jeffrey D.J., Knuth D.E. On the Lambert W Function // Advances in Computational Mathematics, 1996. Vol. 5. P. 329–359 p.
17. Григорьев И.В. Куницкая О.А., Григорьев Г.В., Есин Г.Ю. Исследование кинетики центробежной пропитки древесины / Григорьев И.В., Куницкая О.А., Григорьев Г.В., Есин

Г.Ю. // Изв. высш. учеб. заведений. Лесной журнал, 2013. № 2. С. 60–70.

18. Кривоногова А.С., Бирман А.Р., Нгуен Ван Тоан. Описание математической модели технологии процесса пропитки капиллярно-пористых структур // Education. 2015. № 4(11). С. 81–83.

References

1. Birman A.R., Krivonogova A.S. Use of methods for impregnating long-length assortments of raw materials // The Bulletin of Nizhnevartovsk State University. 2015. № 1. P. 45–48.
2. Krivonogova A.S., Birman A.R. Analysis of the use of impregnation methods in the technology of production of charcoal // Sovremennyj nauchnyj vestnik. Belgorod, 2013. Vol. 9, № 2. P. 21–28.
3. Krivonogova A.S., Birman A.R. Impregnation of capillary-porous structures by the counter-centrifugal method / VGLTU // Aktual'nye napravleniya nauchnyh issledovanij XXI veka: teoriya i praktika: sb. tr. po materialam mezhdunar. zaoch. nauch.-prakticheskoy konf. Voronezh, 2015. № 2, Ch.1. P. 236–240.
4. Patyakin V.I., Tishin Yu.G., Bazarov S.M. Technical hydrodynamics of wood. M.: Lesnaya promyshlennost', 1990. 304 p.
5. Rasev A.I., Kosarin A.A., Krasuhina L.P. Technology and equipment protective wood treatment. M.: MGUL, 2010. 171 p.
6. Birman A.R., Krivonogova A.S., Sokolova V.A., Nguen Van Toan. Technological device for impregnation of capillary-porous bodies / VoGU // Aktual'nye problemy razvitiya lesnogo kompleksa: sb. st. Vologda, 2017. P. 99–101.
7. Krivonogova A.S., Birman A.R., Nguen Van Toan. Urgency of the development of the model of the installation for the impregnation of capillary-porous bodies // Innovacionnye processy v nauchnoj srede: sb. st. mezhdunar. nauch.-prakticheskoy konf. Ufa, 2016. P. 54–56.
8. Krivonogova A.S., Birman A.R. Use of the effectiveness of the method of hydrostatic pressure of an impregnating fluid with an increase in the quality characteristics of wood products // Sovremennyj nauchnyj vestnik. 2013. Vol. 9, № 1. P. 3–10.
9. Krivonogova A.S., Birman A.R., Nguen Van Toan. Development of an experimental technological device for impregnation of capillary-porous bodies: sb. st. mezhdunar. nauch.-prakticheskoy konf. Ufa, 2016. P. 63–65.
10. Sokolova V.A., Krivonogova A.S., Nguen Van Toan, Birman A.R. Updating of installation for the impregnation of capillary-porous bodies // Trudy in-ta landshaftnoj arhitektury, stroitelstva i obrabotki drevesiny. SPb., 2016. P. 4–5.
11. Krivonogova A.S. A mathematical model of the process of impregnation of capillary-porous structures with aqueous solutions of peroxide // Science Review. 2015. № 7. P. 251–256.
12. Birman A.R., Krivonogova A.S., Sokolova V.A. Determination of the filtration coefficient and parameters of the process of impregnation of charcoal in the field of centrifugal forces // Science Review. 2015. № 7. P. 238–243.
13. Goncharov Yu.A. The influence of the features of the structure of wood and the physicochemical properties of the impregnate on the efficiency of wood impregnation in the field of centrifugal forces: dis. ... kand. tekhn. nauk. Petrozavodsk, 2015. 121 p.
14. Birman A.R., Sokolova V.A., Krivonogova A.S. Impregnation of wood by hydrostatic method / VGLTU // Aktual'nye napravleniya nauchnyh issledovanij XXI veka: teoriya i praktika: sb. nauch. tr. Voronezh, 2014. № 5. P. 33–38.
15. Esin G.Yu. Improving the technology of impregnation of hardwood and small-sized coniferous timber: dis. ... kand. tekhn. nauk. Arhangel'sk, 2013. 178 p.
16. Corless R.M., Gonnet G.H., Hare D.E.G., Jeffrey D.J., Knuth D.E. On the Lambert W Function // Advances in Computational Mathematics, 1996. Vol. 5. P. 329–359.

17. Grigor'ev I.V., Kunickaya O.A., Grigor'ev G.V., Esin G.Yu. Study of kinetics of centrifugal impregnation of wood / Grigor'ev I.V., Kunickaya O.A., Grigor'ev G.V., Esin G.Yu. // Bulletin of higher educational institutions. Lesnoy zhurnal, 2013. № 2. P. 60-70.

18. Krivonogova A.S., Birman A.R., Nguen Van Toan. Description of mathematical model of technology of process of impregnation of capillary-porous structures // Education. 2015. № 4 (11). P. 81-83.