УДК 630*841.21:544.022.537:66.018.2+519.876.5:691+69.04 DOI: 10.18324/2077-5415-2018-3-130-135

Теоретическое обоснование процесса движения жидкости в капиллярно-пористых средах в контексте повышения прочностных характеристик материала

А.С. Кривоногова[a], Nguen Van Toan[b], В.А. Соколова[c], А.Р. Бирман[d], В.В. Беспалова[e]

Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет им. С.М. Кирова, Институтский пер. 5, Санкт-Петербург, Россия.
[a]krivonogova.aleksandra@lta-landscape.com, [b]toanckct@gmail.com, [c]sokolova_vika@inbox.ru, [d]birman1947@mail.ru, [e]weronika2002@yandex.ru
[a]https://orcid.org/0000-0001-6320-7197, [b]https://orcid.org/ 0000-0002-9171-0600,
[c]https://orcid.org/0000-0001-6880-445X, [d]https://orcid.org/0000-0003-0416-4232,
[e]https://orcid.org/0000-0001-6139-0899
Статья поступила 28.04.2018, принята 16.06.2018

Критически проанализированы способы пропитки древесины. Экспериментально выявлена методика проведения процесса пропитки, проанализированы возможные способы пропитки защитного характера с возможностью воздействия на повышение качества физико-механических характеристик древесины. Представлены рекомендации к проведению пропитки в поле центробежных сил встречно-центрифужным способом, а также для режимов пропитки на производственном и экспериментальном оборудовании. Даны рекомендации по оценке качественных показателей и характеристик методики пропитки древесных образцов. Произведен анализ явлений, происходящих в древесине в процессе ее модификации, выявлена взаимосвязь некоторых факторов процесса пропитки, определяющих конечные свойства образца. Исследованы параметры взаимосвязи между проницаемостью и характеристиками пропитки капиллярно-пористых элементов, определены возможности проницаемости капиллярно-пористых тел в зависимости от методики проведения пропитки. Определена аналитическая модель технологии пропитки капиллярно-пористого тела встречно-центробежными методами в силовом центробежном поле водными растворами пероксида. Сформулированное обоснование математической модели основных параметров и закономерностей технологии пропитки капиллярно-пористых материалов водными растворами пероксида учитывает особенности поровых пространств материалов древесного происхождения. Параметры скорости пропитки, объемов поглощения пропитываемого раствора, как и закономерности и влияние некоторых параметров процесса на глубину и скорость пропитки, были определены аналитическим способом, а величины этих параметров выявлены экспериментальным методом. Аналитически и экспериментально разработана методика расчета коэффициента фильтрации. Разработана методика экспериментального определения величины и проведен расчет зависимости расхода жидкости, пропитывающей тело, и коэффициента фильтрации. Выявлены аналитическим методом возможности решений с целью исследования процессов пропитки, ограниченных условиями больших скоростей при вращении аппарата центрифуги.

Ключевые слова: древесина; пропитка в поле центробежных сил; пропитка жидкостями; пропитка раствором пероксида; математическая модель процесса пропитки; коэффициент фильтрации; капиллярно-пористые структуры.

Theoretical substantiation of the process of fluid motion in capillary-porous media in the context of increasing the strength characteristics of the material

A.S. Krivonogova[a], Nguen Van Toan[b], V.A. Sokolova[c], A.R. Birman[d], V.V. Bespalova[e]

St. Petersburg State Forest Technical University under name of S.M. Kirov; 5, Institutskiy Per., St. Petersburg, Russia
[a]krivonogova.aleksandra@lta-landscape.com, [b]toanckct@gmail.com, [c]sokolova_vika@inbox.ru, [d]birman1947@mail.ru, [e]weronika2002@yandex.ru
[a]https://orcid.org/0000-0001-6320-7197, [b]https://orcid.org/ 0000-0002-9171-0600,
[c]https://orcid.org/0000-0001-6880-445X, [d]https://orcid.org/0000-0003-0416-4232,
[e]https://orcid.org/0000-0001-6139-0899
Received 28.04.2018, accepted 16.06.2018

Critical ways of impregnating wood are analyzed. The technique of the impregnation process was experimentally revealed, possible ways of impregnation of a protective character with possible influence on the improvement of the quality of physical and mechanical characteristics of wood are analyzed. Recommendations are given for impregnating in the field of centrifugal forces with a counter-

centrifugal method, as well as for impregnation regimes in production and experimental equipment. Recommendations are given on the evaluation of quality indicators and characteristics of the method for impregnating wood samples. An analysis of the phenomena occurring in the wood during the process of its modification is made, the interrelation of some factors of the impregnation process that determine the final properties of the sample is revealed. The parameters of the interrelation between permeability and impregnation characteristics of capillary-porous elements are investigated, the permeability of capillary-porous bodies is determined depending on the technique of impregnation. An analytical model of the technology for impregnating a capillary-porous body with counter-centrifugal methods in a force centrifugal field with aqueous solutions of peroxide is determined. The formulated substantiation of the mathematical model of the main parameters and regularities of the technology for impregnating capillary-porous materials with aqueous solutions of peroxide takes into account the features of pore spaces of materials of wood origin. The parameters of the impregnation rate, the absorption volumes of the impregnated solution, as well as the regularities and influence of some process parameters on the depth and impregnation rate, are determined analytically, and the values of these parameters are determined by the experimental method. Analytical and experimental methods for calculating the filtration coefficient have been developed. A procedure for the experimental determination of the value has been developed and a calculation of the dependence of the flow rate of the liquid impregnating the body and the filtration coefficient has been made. The analytical method is used to determine the feasibility of solutions for investigating the impregnation processes limited by the conditions of high velocities during rotation of the centrifuge apparatus.

Keywords: wood; impregnation in the field of centrifugal forces; impregnation with liquids; impregnation with peroxide solution; mathematical model of impregnation process; filtration coefficient; capillary-porous structures.

Введение

Одна из задач, поставленных перед лесоперерабатывающей промышленностью, заключается в применении технологий модификации древесины с целью переработки малоиспользуемого естественного природного сырья как материала для качественного улучшения потребительских свойств конечного продукта, повышения его естественных физико-технических, технологических параметров и повышения прочностных характеристик [1; 3; 5; 7; 9; 10; 18; 19; 21; 22; 24–27].

В настоящее время предъявляются новые требования к характеристикам древесного материала и, соответственно, к технологическим процессам получения данного материала с целью улучшения качественных характеристик с учетом повышения плотности, твердости, прочности конечного материала [1; 2; 4; 5; 7; 9; 10; 19; 22–27].

Необработанная натуральная древесина разрушается от биологического воздействия окружающей среды. Для улучшения свойств натуральной древесины ее модифицируют пропиткой, например, антисептиками [2; 4; 12; 16; 20–22; 24–26].

Основным способом наполнения древесины жидкостями является пропитка под давлением, конечный результат которой зависит от свойств породы древесины и пропиточной жидкости, давления пропиточной жидкости. При этом важнейшие параметры при проведении процесса пропитки — это коэффициент фильтрации (водопроницаемости) древесины (*K см/мин, K м/сутки*) и ее продолжительность при заданном давлении [2; 4; 11–13; 18–22].

Проанализировав результаты исследований, проведенных в сфере переработки и модификации древесины, можно отметить целесообразность и необходимость дальнейших поисков в этой области и формирования на этой основе новых технологических решений и видов оборудования для пропитки и уплотнения древесины [2; 4; 12; 15; 17–19; 21; 22; 24; 27].

Цель исследования — создание перспективных технологических решений и видов оборудования для пропитки и уплотнения древесины.

Следует выделить один из наиболее продуктивных способов антисептирования древесины путем тепловой обработки в капсуле с заполнением 10%-ным водным раствором пероксида водорода, помещенной в центробежное поле сил [2; 4; 15; 19; 21; 22].

Методика исследования. Поиски в ходе исследования основывались на идеях системного подхода с использованием методик и обоснований методов научного поиска.

Для оценки возможности использования методов пропитки древесины с целью повышения прочностных характеристик в СПбГЛТУ были проведены опытно-экспериментальные исследования [19–22], методы которых построены на анализе сравнения явлений, происходящих в древесине в процессе ее модификации. Выявлено взаимодействие некоторых определяющих факторов процесса пропитки на свойства и характеристики конечного продукта образцов модифицированной древесины с учетом их влияния на повышение качественных характеристик материала [20–22; 24; 26]. Определяющим этапом экспериментальных исследований стали эксперименты по пропитке древесины 10%-ным водным раствором пероксида водорода [1; 5; 7; 15; 20–22].

Было выявлено, что весьма интенсивный процесс окисления возможен при максимальном контакте пероксида с площадью сечения капиллярно-пористого тела [9; 10; 19; 21; 22]. Такого контакта можно добиться пропиткой капиллярно-пористой структуры пероксидом до тепловой обработки, поместив капсулу с углем и водным раствором пероксида в центробежном поле [3; 19; 21; 22]. Технологически это возможно осуществить способом размещения капсул с образцами по периферии вращения платформы самой центрифуги [1; 5; 7; 16; 20–22].

Способы пропитки образцов на центрифуге известны, давно апробированы [2; 4; 11; 13; 20–22] и дают при пропитке капиллярно-пористых тел вполне приличные результаты. Отмеченный способ характеризуется обеспечением равномерной сквозной пропиткой капиллярно-пористой структуры [9; 10; 21–23].

Необходимо отметить, что при пропитке древесных капиллярно-пористых структур с повышенными характеристиками влажности раствор пероксида имеет наибольшее диффузионное и капиллярное проникновение [3–5; 9–12; 19–22], а после процесса пропитки возможно небольшое дополнительное диффузионное перераспределение [2; 4; 11; 20–22]. В этом случае метод диффузионного распределения является функцией от влажности [2; 4; 11; 12; 21–23].

Исследование закономерностей процесса пропитки капиллярно-пористых тел связано с изучением процесса проницаемости, который, как правило, выявляют по основам закона Дарси, согласно которому процесс движения жидкости записывается формулой (1) [2; 4; 11; 12; 20–22]:

$$U = \frac{k}{\mu} A \frac{P_1 - P_2}{L}, \quad (1)$$

где L, A — длина и площадь сечения образца; k — коэффициент проницаемости; μ — вязкость жидкости; U — скорость движения жидкости; P_1–P_2 — градиент давления на торцах образца [11; 20–22].

Существующие способы процессов пропитки капиллярно-пористых тел классифицируются, основываясь на основных трех [22] физических процессах явлений [20–22]: диффузное движение молекул; движение жидкости в древесной структуре под действием избыточного внешнего давления; движение жидкости в древесной структуре при действии капиллярных сил.

Технология центробежной пропитки основывается на перечисленных выше явлениях и представляется одной из наиболее эффективных технологий пропитки [1; 2; 4; 5; 7; 11; 13; 20–23]. Виды центробежного оборудования и сведения опытно-экспериментальных исследований процессов пропитки древесных материалов описаны в [2; 4; 11; 13; 12; 20–23]. В задачу данной работы входит описание технологии пропитки капиллярно-пористых сред встречно-центробежным методом в силовом центробежном поле математическим методом [4; 9; 11; 12; 20–23].

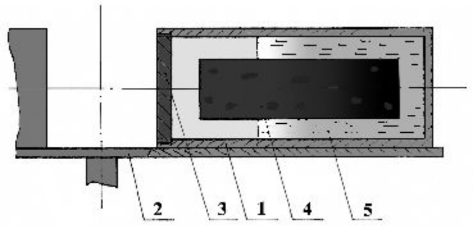

Рис. 1. Пропитка элемента образца встречным способом в центробежном поле: 1 — стакан; 2 — платформа; 3 — пробка; 4 — образец; 5 — пропитывающая жидкость

Допустим, пропитываемый образец представляет собой цилиндром с осью в центробежной установке, совпадающей с полярным радиусом, которая вращается вокруг центра полюса системы координат. Тогда наша задача приводится к дифференциальному уравнению, не учитывающему сжимаемость жидкости [4; 11; 21; 22]. Принципиальное отличие данной задачи заключается в том, что граница области пропитки перманентно изменяется по времени. Тогда выстраивается задача Стефана, решение которой в редких случаях возможно выстроить в замкнутой форме [11; 21–23]. Представленные далее решения выражаются в квадратурах и на некоторых этапах — в элементарных функциях. Таким образом, возможно определить главные этапы процесса пропитки, аналитически выявить влияние разнообразных параметров на глубину и скорость пропитки, рекомендовать элементарные способы опытно-экспериментального расчета величин данных параметров [4; 11; 15; 20–22].

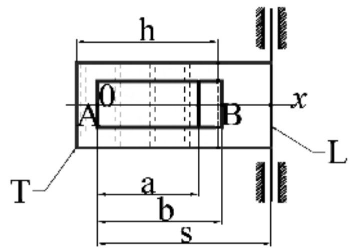

Рис. 2. Схема пропитки элемента встречным способом в центробежном силовом поле: *T* — наполненный жидкостью цилиндр, который вращается вокруг оси *L*

Представим образец AB как прямой стержень длиной b (рис. 2), помещенный в цилиндр T, который наполнен раствором. Образец AB вращается одновременно с цилиндром T вокруг оси L с угловой скоростью ω. Уровень высоты столба жидкости в цилиндре равен величине h, ось L перпендикулярна L ⊥ AB. Допускаем, что стержень AB и раствор несжимаемы [11; 21; 22], тогда продольная фильтрация в образце будет подчиняться закону Дарси:

$$\upsilon(x,t) = -K\frac{dH}{dx},$$
$$H(x,t) = u(x,t) - \frac{1}{2}\rho\omega^2(a-x)(2s-a-x), \quad (2)$$

где *u(x,t)* — поровое давление в образце; *H(x,t)* — гидравлический напор; *k* — коэффициент продольной фильтрации; υ — скорость фильтрующейся поровой жидкости в направлении оси x; *x* — продольная координатная ось, начало которой *x* = 0 совпадает с точкой *A*; *s* — расстояние от точки *A* до оси *L*; ρ — плотность жидкости [4; 11; 21; 22].

Проницаемость раствора нижнего среза торца элемента и боковые поверхности при x = 0 показаны в формулах (3), (4):

$$u(0,t) = \frac{1}{2}\rho\omega^2 h(2s-h), \quad (3)$$

$$Q(x,t) = -\alpha^2\left[u(x,t) - \frac{1}{2}\rho\omega^2(h-x)(2s-h-x)\right] \quad (4)$$

Здесь $Q(x,t)$ — направление потока пропиточной жидкости сквозь боковые стенки стержня, которое определяется по формуле Ньютона и пропорционально разности между средними поровыми давлениями в стержне и внешним давлением пропиточной жидкости; α^2 — коэффициент боковой фильтрации [4; 15; 11; 13; 21; 22].

Допустим, в конкретный момент времени *t* = 0 элемент полностью обезвожен, тогда возникает возможность появления снаружи мгновенного центробежного поля давлений (5):

$$\frac{1}{2}\rho\omega^2 \cdot (h-x)\cdot(2s-h-x). \quad (5)$$

Теперь за счет коэффициента фильтрации в свободный момент времени t показатель объемной пропитки стержня *AB* поднимется на отметку определенной точки $x = a$. Область $x \in (0, a)$ пропитывается раствором, давление которого подчиняется дифференциальному уравнению коэффициента фильтрации, которое не содержит [4; 11; 21; 22] производных по времени из-за несжимаемости (6):

$$\frac{\partial^2 H}{\partial x^2} - \alpha^2 H = q, \quad x \in (0, a)$$
$$q = -\frac{1}{2}\alpha^2 \rho\omega^2 \cdot (a-h)\cdot(2s-a-h), \; a \le h \le s \tag{6}$$

Требуется проанализировать приграничное условие на самой верхней границе процесса пропитки $x = a$. Тогда, вследствие капиллярно-пористой структуры строения древесного сырья, будут действовать силы поверхностного натяжения, действующие с давлением P_a. Давление будет показывать разные величину и знаки, зависящие от не смачивания или смачивания экспериментальной пары «древесный материал – жидкость» и от силы взаимосвязи молекул этой пары [4; 11; 21; 22].

Анализируя приграничное условие по формуле, можно найти скорость фильтрации $\upsilon\,(a,t)$ и дифференцировать уравнение баланса пропиточного раствора, вытекающего за некоторое время *dt* в область элемента *da* (7) [4; 11; 20; 21; 22]:

$$da = \upsilon(a,t)dt\,. \tag{7}$$

Определяем скорость движения уровня границы пропиточной жидкости по условию $a(0) = 0$ или $a(0) = a_*$, где a_* — глубина уровня пропитки в момент времени $t = 0$, возникающая за период времени разгона центрифуги до скорости ω. Можно найти уровень глубины пропиточной жидкости $a(t)$, время t_1, необходимое для пропитки на глубину a_1, и еще некоторые физические параметры всего данного процесса пропитки [4; 11; 15; 20–22].

Тогда решение дифференциального уравнения будет представлено в виде (8):

$$H = Ae^{\alpha x} + Be^{-\alpha x} + H_*$$
$$H_* = \frac{1}{2}\rho\omega^2(a-h)\cdot(2s-a-h) \tag{8}$$

Чтобы выполнить нахождение произвольных постоянных A и B, применим приграничные условия, из которых, с учетом (8), следует (9) [4; 9–11; 21; 22]:

$$H(0,t) = \frac{1}{2}\rho\omega^2(a-h)\cdot(2s-a-h)$$
$$H(a,t) = P_a \tag{9}$$

Подставив (9) в (8), получим выражение (10):

$$A = \frac{1}{2sh\alpha a}\left[\rho\omega^2\cdot(h-a)\cdot(2s-h-a)\cdot\left(\frac{1}{2} - e^{-\alpha a}\right.\right.$$
$$B = \rho\omega^2\cdot(h-a)\cdot(2s-h-a)\cdot\left[1 - \frac{1/2 - e^{-\alpha a}}{2sh\alpha a}\right] - \tag{10}$$

Подставив (10) в (9), получим выражение (11):

$$H = \rho\omega^2\cdot(h-a)\cdot(2s-h-a)\cdot$$
$$\cdot\left[\frac{1/2 - e^{-\alpha a}}{2sh\alpha a}\cdot sh\alpha x + \frac{1}{e^{\alpha x}} - \frac{1}{2}\right] + \frac{P_a sh\alpha x}{2sh\alpha x} \tag{11}$$

Из закона Дарси следует выражение (12):

$$\upsilon(a,t) = -K\alpha R(a),$$
$$R(a) = P_a + \left(\frac{1}{2} - e^{-\alpha a}\right)\cdot\rho\omega^2(h-a)\cdot(2s-h-a)\times$$
$$\times cth\alpha a - e^{-\alpha a}\rho\omega^2(h-a)\cdot(2s-h-a) \tag{12}$$

Выделяя переменные, проинтегрировав с учетом начальных условий $a(0) = 0$, выведем (13):

$$\int_0^a \frac{d\varphi}{R(\varphi)} = -K\alpha t,$$
$$t = -\frac{1}{K\alpha}\int_0^a \frac{d\varphi}{R(\varphi)} \tag{13}$$

Данное интегрирование в общем случае при элементарных функциях не производится, но при некоторых параметрах α, *k*, ω, ρ, P_a, *s*, *h* и *a* можно вычислить и протабулировать средствами помощи ЭВМ. При элементарных произведениях αa можно рассчитать в элементарных функциях методом сведения функции $cth(\alpha\varphi)$ в ряды Тейлора по степеням $\alpha\varphi$ и удержания числа конечных членов [4; 11; 21; 22]. Данные вычисления справедливы, если выполнять испытания на образцах, длина которых мала $a << s$, $\alpha\varphi << 1$ для нахождения описанных выше параметров, что и было выполнено при опытно-экспериментальных исследованиях [2; 4; 11; 13; 15; 20–22].

Выделим некоторые принципиальные частные случаи решения данной задачи. При условии слабой боковой пропитки, что соответствует реальной практике, появляется возможность пренебречь коэффициентом α [4; 11; 20–22]. Получим упрощение уравнение (11), и оно принимает вид (14):

$$\frac{d^2 H}{dx^2} = 0,$$
$$H = Ax + B$$
$$A = a^{-1}\left[P_a - \frac{1}{2}\rho\omega^2(h-a)(2s-h-a)\right], \tag{14}$$
$$B = \frac{1}{2}\rho\omega^2(h-a)(2s-h-a)$$

Его решение с учетом ранних приграничных условий получает вид (15):

$$H(x,t) = \frac{1}{2}\rho\omega^2(h-a)(2s-h-a)\left(1 - \frac{x}{a}\right) + P_a\frac{x}{a} \tag{15}$$

Скорость пропитки выражается формулой (16):

$$\frac{da}{dt} = \frac{k}{a}\left[\frac{1}{2}\rho\omega^2(h-a)(2s-h-a) - P_a\right] \qquad (16)$$

Из проведенных расчетов следует, что скорость пропитки максимальна при $a = 0$, в начале процесса пропитки, и при $P_a = 0$ скорость обращается в ноль при $h = a$. Следовательно, будет неэффективна пропитка образцов, длина которых приближена к размеру радиуса платформы центрифуги [2; 4; 6; 11; 13; 20–22].

Результаты исследования. Проведенный анализ исследования выявил следующее:

– аналитическая модель пропитки капиллярно-пористых тел растворами пероксида подтверждает, что метод центробежной пропитки наиболее эффективен;

– для процесса пропитки капиллярно-пористых тел рационально применять встречно-центробежный способ;

– задача Стефана определяет главные принципы процесса пропитки капиллярно-пористых тел и позволяет выявить методы опытно-экспериментального нахождения величин параметров, определяющих скорость и глубину пропитки;

– максимально интенсивное поглощение пропиточного раствора капиллярно-пористым телом (метод встречно-центробежной пропитки) происходит в наиболее короткий начальный временной период пропитки, что определяет нецелесообразность длительной пропитки в центробежном силовом поле.

– пропитка элементов длиной, близкой к радиусу платформы центрифуги, нерациональна [11; 21; 22].

Выводы

Математические модели процессов пропитки капиллярно-пористых структур дают возможность оптимизировать методы технологических процессов модифицирования изначальных материалов из древесины мягких лиственных пород, раскрывают новые области функционального применения такой древесины, расширяют области применения теории процесса пропитки капиллярно-пористых тел, выявляют принципы изменения физико-механических характеристик древесных материалов методом глубокого уплотнения, позволяют обосновать критерии и дают возможность их применения с экономической целесообразностью в современных изменяющихся социальных условиях применения модифицированной древесины мягких лиственных пород [21; 22].

Представленные результаты и выводы данного исследования логичны к применению в сфере управления технологическими процессами деревообрабатывающих производств [21; 22].

Литература

1. Бирман А.Р., Соколова В.А., Кривоногова А.С. Борирование древесины пропиткой с целью повышения её нейтронозащитных свойств // Изв. С.-Петерб. лесотехн. акад. 2014. Вып. 208. С. 130-137.

2. Бирман А.Р., Кривоногова А.С. Использование методов пропитки длинномерных сортиментов сырья // Вестн. Нижневарт. гос. ун-та. 2015. № 1. С. 45-48.

3. Бирман А.Р., Локштанов Б.М., Кривоногова А.С., Тоан Нгуен Ван. Критический анализ использования способов пропитки с целью повышения качественных характеристик древесного сырья // Актуальные проблемы развития лесного комплекса. 2016. С. 58-60.

4. 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.

5. Бирман А.Р., Соколова В.А., Кривоногова А.С. Пропитка древесины гидростатическим способом / ВГЛТА // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика: сб. науч. тр. по материалам заоч. науч.практической конф. Воронеж, 2014. № 5, Ч. 4 (10-4). С. 33-38.

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. Вологда, 2017. С. 99-101.

7. Бирман А.Р., Соколова В.А., Кривоногова А.С. Торцовая пропитка длинномерных сортиментов // Научное обозрение. 2014 № 7. С. 281-285.

8. 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. по материалам науч.-практической конф. Уфа, 2016. Ч. 3. С. 54-56.

9. Кривоногова А.С., Бирман А.Р. Анализ использования способов пропитки в технологии производства древесного угля // Современный научный вестник. 2013 Т. 9, № 2. С. 21-28.

10. 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. 310 с.

11. Кривоногова А.С. Математическая модель процесса пропитки капиллярнопористых структур водными растворами пероксида // Научное обозрение. 2015 № 7. С. 251-256.

12. Кривоногова А.С., Бирман А.Р., Соколова В.А., Нгуен Ван Тоан, Белоногова Н.А. Моделирование процесса пропитки капиллярно-пористых структур в производстве древесноугольных сорбентов / СПбГЛТУ // Леса России: политика, промышленность, наука, образование: материалы науч. – технической конф. СПб., 2016. С. 204-205.

13. Кривоногова А.С., Бирман А.Р. Пропитка капиллярнопористых структур встречно-центробежным способом / ВГЛТА // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика: сб. тр. по материалам междунар. заоч. науч.- практической конф.Воронеж, 2015. № 2, Ч. 1 (13-1). С. 236-240.

14. Кривоногова А.С., Бирман А.Р., Нгуен Ван Тоан. Разработка экспериментального технологического устройства для пропитки капиллярнопористых тел // Инновационные механизмы решения проблем научного развития: сб. ст. по материалам науч. –практической конф., 2016. Уфа, 2016. Ч. 3. С. 63-65.

15. Кривоногова А.С.Совершенствование технологии подготовки древесины мягких лиственных пород для производства угля высокого качества: автореф. дис. … канд. техн. наук. СПб., 2015. 20 с.

16. Патякин В.И., Тишин Ю.Г., Базаров С.М. Техническая гидродинамика древесины. М.: Лесная промышленность, 1990. 304 с.

17. Соколова В.А., Кривоногова А.С., Нгуен Ван Тоан, Бирман А.Р.Актуализация установки для пропитки капиллярно-пористых тел // Труды института ландшафтной архитектуры, строительства и обработки древесины / СПбПУ Петра Великого. СПб., 2016. С. 4-5.

18. Соколова В. А., Бирман А.Р., Белоногова Н.А., Кривоногова А.С., Нгуен Ван Тоан. Топливные брикеты новой конфигурации // Системы Методы Технологии. 2017. Вып. 1 (33). С. 97-101.

19. Соколова В. А., Бирман А.Р., Сергеевичев В.В., Кривоногова А.С. Вопросы области применения модифицированной древесины методом глубокого уплотнения // Материалы второй междунар. науч.-технической конф. «Леса Россия: политика, промышленность, наука, образование». СПб., 2017. С. Т. 3. С. 128-130.

20. Соколова В. А., Бирман А.Р., Белоногова Н.А., Кривоногова А.С., Нгуен Ван Тоан. Актуальные вопросы разработки экспериментальной установки для пропитки капиллярнопористых тел // Материалы второй междунар. науч.-технической конф. «Леса Россия: политика, промышленность, наука, образование». СПб., 2017. Т. 3. С. 93-95.

References

1. Birman A.R., Sokolova V.A., Krivonogova A.S. Boration of wood impregnation with the purpose of increase of its neutronprotective propertie // Izvestia SPbLTA. 2014. Vyp. 208. P. 130-137.

2. 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.

3. Birman A.R., Lokshtanov B.M., Krivonogova A.S., Toan Nguen Van. Critical analysis of the use of impregnation methods to improve the quality characteristics of wood raw materials // Aktual'nye problemy razvitiya lesnogo kompleksa. 2016. P. 58-60.

4. 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.

5. Birman A.R., Sokolova V.A., Krivonogova A.S. Impregnation of wood by hydrostatic method / VGLTA // Aktual'nye napravleniya nauchnyh issledovanij XXI veka: teoriya i praktika: sb. nauch. tr. po materialam zaoch. nauch.prakticheskoj konf. Voronezh, 2014. № 5, Ch. 4 (10-4). P. 33-38.

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. Vologda, 2017. P. 99-101.

7. Birman A.R., Sokolova V.A., Krivonogova A.S. Facing impregnation of long logs // Science Review. 2014. № 7. P. 281-285.

8. 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. po materialam nauch.-prakticheskoj konf. Ufa, 2016.Ch. 3. P. 54-56.

9. Krivonogova A.S., Birman A.R. Analysis of the use of impregnation methods in the technology of production of charcoal // Sovremennyj nauchnyj vestnik. 2013. T. 9, № 2. P. 21-28.

10. 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. T. 9, № 1. P. 3-10.

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. Krivonogova A.S., Birman A.R., Sokolova V.A., Nguen Van Toan, Belonogova N.A.Modeling of the process of impregnation of capillary-porous structures in the production of charcoal sorbents / SPbGLTU // Lesa Rossii: politika, promyshlennost', nauka, obrazovanie: materialy nauch.-tekhnicheskoj konf. SPb., 2016. P. 204-205.

13. Krivonogova A.S., Birman A.R. Impregnation of capillary-porous structures by the counter-centrifugal method / VGLTA // Aktual'nye napravleniya nauchnyh issledovanij XXI veka: teoriya i praktika: sb. tr. po materialam mezhdunar. zaoch. nauch.- prakticheskoj konf. Voronezh, 2015. № 2, Ch.1 (13-1). P. 236-240.

14. Krivonogova A.S., Birman A.R., Nguen Van Toan. Development of an experimental technological device for impregnation of capillary-porous bodies // Innovacionnye mekhanizmy resheniya problem nauchnogo razvitiya: sb. st. po materialam nauch.-prakticheskoj konf., 2016. Ufa, 2016. Ch. 3. P. 63-65.

15. Krivonogova A.S. Perfection of the technology of softwood hardwood preparation for the production of high quality coal: avtoref. dis. … kand. tekhn. nauk. SPb., 2015. 20 p.

16. Patyakin V.I., Tishin Yu.G., Bazarov S.M. Technical hydrodynamics of wood. M.: Lesnaya promyshlennost', 1990. 304 p.

17. Sokolova V.A., Krivonogova A.S., Nguen Van Toan, Birman A.R. Updating installation for the impregnation of capillary-porous bodies // Trudy instituta landshaftnoj arhitektury, stroitel'stva i obrabotki drevesiny / SPbPU Petra Velikogo. SPb., 2016. P. 4-5.

18. Sokolova V.A., Birman A.R., Belonogova N.A., Krivonogova A.S., Nguen Van Toan. Fuel briquettes of a new configuration // Systems Methods Technologies. 2017. Vyp. 1.(33). P. 97-101.

19. Sokolova V. A., Birman A.R., Sergeevichev V.V., Krivonogova A.S. Questions of the field of application of modified wood by the method of deep // Materialy vtoroj mezhdunar. nauch.-tekhnicheskoj konf. «Lesa Rossiya: politika, promyshlennost', nauka, obrazovanie». SPb., 2017. T. 3. P. 128-130.

20. Sokolova V. A., Birman A.R., Belonogova N.A., Krivonogova A.S., Nguen Van Toan.Actual questions of the development of an experimental setup for the impregnation of capillary-porous bodies // Materialy vtoroj mezhdunar. nauch.-tekhnicheskoj konf. «Lesa Rossiya: politika, promyshlennost', nauka, obrazovanie». SPb., 2017. T. 3. P. 93-95.