УДК 603.226:630.31 DOI: 10.18324/2077-5415-2018-2-121-124

Уточненная модель процесса центробежной пропитки древесины

С.В. Кучер[1a], Г.В. Григорьев[1b], В.А. Иванов[2c]

[1]Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет им. С.М. Кирова, пер. Институтский 5, Санкт-Петербург, Россия
[2]Братский государственный университет, ул. Макаренко 40, Братск, Россия
[a]suroga.kucher@gmail.com, [b] vtl-lta@mail.ru, [c] ivanovva55@mail.ru
[a]https://orcid.org/0000-0002-0135-9678, [b] https://orcid.org/0000-0001-5742-3870,
[c]https://orcid.org/0000-0003-0707-972X
Статья поступила 2.04.2018, принята 27.04.2018

Статья посвящена исследованию одного из эффективных способов повышения эксплуатационных свойств низкотоварной древесины — ее пропитки различными импрегнатами в поле центробежных сил. Из анализа результатов предыдущих работ следует, что к настоящему времени по данному вопросу накоплена обширная теоретическая и экспериментальная база. Развивая теоретические положения, авторы представляют уточненную математическую модель процесса пропитки, которая в явном виде учитывает силы, возникающие в капиллярах и порах древесины при проникновении пропиточной жидкости. По результатам исследования получено дифференциальное уравнение, позволяющее определить положение фронта пропитки в определенный момент времени с учетом как свойств импрегната (плотность и вязкость), параметров процесса пропитки (радиус и частота вращения платформы центрифуги, давление пропиточной жидкости в емкости), так и параметров, определяемых парой «порода древесины – импрегнат» (коэффициенты фильтрации и поверхностного натяжения), а также микростроения древесины, которое учитывается величиной радиусов пор и капилляров. Приводится пример расчета положения фронта центробежной пропитки при различном значении радиуса капилляра древесины. Показано, что предлагаемая модель позволяет учесть микростроение древесины при расчете скорости центробежной пропитки. За счет введения в уравнение для расчета положения фронта пропитки дополнительного параметра, характеризующего распределение пор и капилляров древесины по размерам, в дальнейшем предлагаемую модель можно использовать при исследовании равномерности центробежной пропитки древесины при варьировании параметров процесса с целью их оптимизации.

Ключевые слова: пропитка древесины; центрифугирование; микростроение древесины; фильтрация жидкости.

A refined model of wood centrifugal impregnation

S.V. Kucher[1a], G.V. Grigorev[1b], V.A. Ivanov[2c]

St. Petersburg State Forest Technical University under name of S.M. Kirov; 5, Institutsky Per., St. Petersburg, Russia
Bratsk State University; 40, Makarenko St., Bratsk, Russia
[a] suroga.kucher@gmail.com, [b] vtl-lta@mail.ru, [c] ivanovva55@mail.ru
[a]https://orcid.org/0000-0002-0135-9678, [b] https://orcid.org/0000-0001-5742-3870,
[c]https://orcid.org/0000-0003-0707-972X
Received 2.04.2018, accepted 27.04.2018

The paper deals with one of effective ways to improve the operational properties of low-value wood - its impregnation with various impregnates in the field of centrifugal forces. At first, the present paper provides an analysis of the study of the impregnation of wood on centrifuges, which were performed earlier. From the analysis of the results of previous studies it follows that wood science accumulates a vast theoretical and experimental base for impregnating wood in the field of centrifugal forces except data related on wood microstructure influence. The aim of this work is to present an improved mathematical model of the process of wood impregnation in the field of centrifugal forces, in which we explicitly take into account the forces that arise in the capillaries and pores when impregnating them with liquid penetrates. Based on the results of the study, we obtain a differential equation that allows us to determine the position of the impregnation front at a certain time, taking into account both the properties of the impregnate (density and viscosity), parameters of the impregnation process (the radius of the centrifuge platform, the rotation speed of the centrifuge platform, the pressure of the impregnating liquid in the tank), parameters determined by a pair of "wood-impregnate" (filtration coefficient, surface tension coefficient), as well as microstructure of wood, which is taken into account by pores and capillaries radiuses. The paper gives an example of calculating the position of the front of centrifugal impregnation at different values of wood capillary radius. As a result,mthe research shows that the model proposed allows for the microstructure of wood to be taken into account in calculating the rate of centrifugal impregnation. Due to the introduction of an additional parameter in the equation for impregnation front position, which characterizes the distribution of pores and wood capillaries in size, the proposed model can later be used to study the uniformity of centrifugal impregnation when the process parameters are varied in order to optimize them.

Keywords: wood impregnation; centrifugal; wood microstructure; liquid filtration.

Введение

Одним из эффективных способов повышения эксплуатационных свойств низкотоварной древесины является ее пропитка различными импрегнатами в поле центробежных сил [1, 2].

Исследования пропитки древесины на центрифугах выполнялись и ранее, резюмируем основные их результаты.

В работе [3] рассмотрены общие вопросы движения жидкости в древесных средах, получены основополагающие уравнения, относящиеся к пропитке и обезвоживанию древесных материалов силовых полях различной природы. Общая постановка задач не предполагала детального исследования пропитки на центрифугах, ряд практически важных вопросов отставлен авторами для последующей проработки.

В работе [4], базирующейся на [3], получены эмпирические сведения о пропитке и обезвоживании древесины в поле центробежных сил. Основное внимание уделено пропитке и обезвоживанию заготовок для производства торцового паркета, в этой области получены практические результаты, ценные при обосновании рассмотренной технологии.

В работах [5, 6] построена математическая модель процесса пропитки на основе закона фильтрации Дарси, получены коэффициенты фильтрации при пропитке древесины сосны, ели, осины и березы жидкостями, близкими по свойствам к воде. Определена область изменения параметров процесса пропитки (частота вращения, радиус платформы центрифуги), в которой корректно применение закона Дарси. Строение древесины и свойства пропиточной жидкости не учитываются в теоретической модели, их влияние отражают только экспериментальные коэффициенты фильтрации, что сужает область применения результатов.

В работах [7–9] предложена теоретическая модель, базирующаяся на нелинейном законе фильтрации, в котором связь скорости фронта пропитки и гидравлического напора импрегната принята в виде степенной зависимости. Выполнено численное исследование нелинейного уравнения скорости фильтрации жидкости, на основе анализа численных данных предложен план экспериментальных исследований. Установлена область применения нелинейного закона фильтрации. Опыты выполнены для древесины осины и березы, пропитка проводилась водным раствором антипирена и креозотом. Получены экспериментальные значения коэффициентов фильтрации для сочетаний породы древесины и пропиточной жидкости. Как и в предыдущих исследованиях, строение древесины и свойства пропиточной жидкости учтены только качественно, с использованием поправочных коэффициентов.

В работе [10] выполнено обобщение результатов [5–9], модель процесса пропитки древесины интегрирована в более общую модель процесса модификации низкотоварной древесины с целью получения заготовок с заданными механическими свойствами. Результаты дополнены экспериментальными данными о пропитке древесины ольхи. Цель автора — включить модель процесса пропитки в описание технологии модификации древесины, по этой причине ряд вопросов, относящихся к обоснованию параметров пропитки, оставлен для последующей проработки. Например, не учитывалось детально строение древесины, по этой причине не рассматривалась равномерность проникновения импрегната в заготовки.

Далее в работах [11–13] использована математическая модель на базе закона фильтрации Дарси, но, в отличие от [5–9], коэффициенты фильтрации определены для пород древесины и независимы от свойств импрегната (последние учитываются вязкостью и плотностью и входят в математическую модель как независимые параметры). Основная часть этих работ посвящена эксперименту по изучению пропитываемости зон ранней и поздней древесины у хвойных пород (сосна, ель). Установлено, что поздняя древесины пропитывается сравнительно медленнее, приводятся количественные результаты, относящиеся к коэффициентам фильтрации зон ранней и поздней древесины сосны и ели.

Зарубежными исследователями также проводились исследования пропитки древесины, сосредоточенные, в основном, на изучении областей применения линейного и нелинейных законов фильтрации [14–21].

Как следует из анализа результатов предыдущих исследований, к настоящему времени накоплена обширная теоретическая и экспериментальная база по пропитке древесины в поле центробежных сил. Тем не менее, строение древесины учитывается, в основном, качественно. Для перехода к количественному описанию влияния строения древесины на ее пропитываемость требуются дальнейшие исследования.

Зададимся *целью* представить уточненную математическую модель процесса пропитки древесины в поле центробежных сил, в которой в явном виде учтем силы, возникающие в капиллярах и порах при проникновении в них пропиточной жидкости.

Материалы и методы исследования: литературные источники, математический анализ.

Результаты исследования. За основу при составлении математической модели примем схему, представленную на рис. 1 [3].

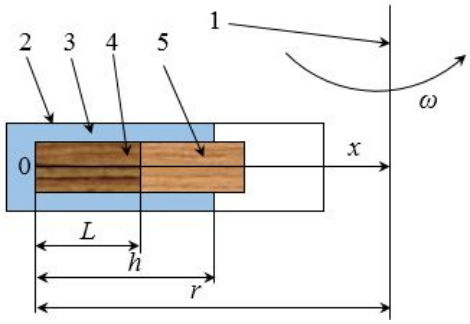

Рис. 1. Общая схема к составлению математической модели пропитки древесины на центрифуге: *1* — ось вращения платформы центрифуги (платформа условно не показана); *2* — пропиточная емкость; *3* — пропиточная жидкость; *4* — пропитанная зона заготовки; *5* — не пропитанная древесина

Давление пропиточной жидкости в емкости определим по формуле:

$$p_{ЦБ} = \rho \int_{x}^{h} \varepsilon dx , \qquad (1)$$

где ρ — плотность пропиточной жидкости; ε — центробежное ускорение; h — расстояние от поверхности жидкости до торца заготовки; x — координата, отсчитываемая от торца заготовки по направлению к оси вращения платформы.

Центробежное ускорение переменно по радиусу платформы центрифуги:

$$\varepsilon = \omega^2 (r - x), \quad (2)$$

где ω — угловая скорость вращения платформы центрифуги; r — расстояние от торца заготовки до оси вращения платформы центрифуги.

Таким образом, давление $p_{ЦБ}$ рассчитаем по формуле:

$$p_{ЦБ} = \omega^2 \rho \int_x^h (r - x) dx . \quad (3)$$

Взятие интеграла по уравнению (3) приводит к следующей формуле:

$$p_{ЦБ} = \frac{1}{2} \omega^2 \rho (h - x)(2r - h - x) . \quad (4)$$

При $x = L$ получим:

$$p_{ЦБ} = \frac{1}{2} \omega^2 \rho (h - L)(2r - h - L) , \quad (5)$$

где L — длина пропитанной зоны заготовки.

Как следует из формулировки закона фильтрации Дарси, скорость фронта пропитки связана с гидравлическим напором следующим образом:

$$\frac{dx}{dt} = \frac{k}{\mu} \frac{p}{L} , \quad (6)$$

где k — коэффициент фильтрации; μ — вязкость пропиточной жидкости; p — давление пропиточной жидкости.

Давление в формуле (7) определим как сумму давления $p_{ЦБ}$, а также напряжений, вызванных поверхностным натяжением жидкости в капиллярах заготовки:

$$p = p_{ЦБ} + p_к . \quad (7)$$

Капиллярное давление определим по формуле:

$$p_к = \frac{2\sigma}{r_к} , \quad (8)$$

где σ — коэффициент поверхностного натяжения; $r_к$ — радиус капилляра.

Подставим выражения (5), (7), (8) в уравнение (6), тогда:

$$\frac{dx}{dt} = \frac{k}{\mu} \frac{1}{L} \left\{ \frac{1}{2} \omega^2 \rho (h - L)(2r - h - L) + \frac{2\sigma}{r_к} \right\} \quad (9)$$

При этом длина пропитанной зоны определяется по формуле пути при переменной скорости движения:

$$L = \int_0^t \frac{dx}{dt} dt , \quad (10)$$

таким образом:

$$\frac{dL}{dt} = \frac{dx}{dt} . \quad (11)$$

Подставив выражение (11) в уравнение (9), получим дифференциальное уравнение для фронта пропитки L:

$$L \frac{dL}{dt} = \frac{k}{\mu} \left\{ \frac{1}{2} \omega^2 \rho (h - L)(2r - h - L) + \frac{2\sigma}{r_к} \right\} \quad (12)$$

Дифференциальное уравнение (12) позволяет определить положение фронта пропитки L в момент времени t с учетом как свойств импрегната (ρ, μ), параметров процесса пропитки (r, h, ω), так и параметров, определяемых парой «порода древесины – импрегнат» (k, σ), а также микростроения древесины, которое учитывается величиной $r_к$.

На рис. 2 представлены графики численного решения уравнения (12) при следующих параметрах: ω = 20 с$^{-1}$; r = 2 м; h = 0,4 м; ρ = 1 000 кг/м^3; μ = 0,002 Па·с; σ = 0,0727 Па·м; $r_к = 2{,}45 \cdot 10^{-6}$ м, $2{,}45 \cdot 10^{-5}$ м.

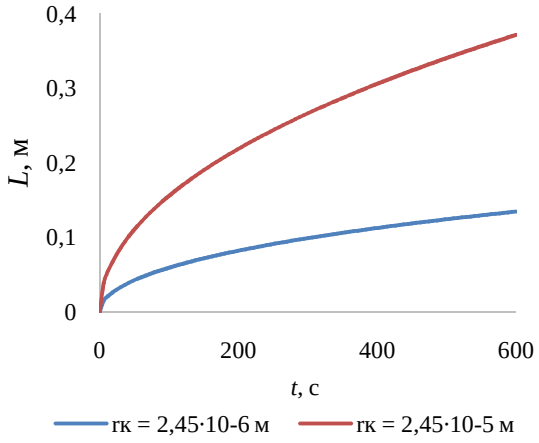

Рис. 2. Пример расчета положения фронта центробежной пропитки при различном значении радиуса капилляра древесины

Заключение

Как показывают расчеты, предлагаемая модель позволяет учесть микростроение древесины при расчете скорости центробежной пропитки. За счет введения в уравнение (12) дополнительного параметра, характеризующего распределение пор и капилляров древесины по размерам, в дальнейшем предлагаемую модель можно использовать при исследовании равномерности центробежной пропитки древесины при варьировании параметров процесса с целью их оптимизации.

Литература

1. Grigorev I., Khitrov E., Kalistratov A., Bozhbov V., Ivanov V. New approach for forest production stocktaking based on energy cost. Всборнике: International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM 14. 2014. С. 407-414.

2. Grigorev I., Nikiforova A., Khitrov E., Ivanov V., Gasparian G. Softwood harvesting and processing problem in russian federation // International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM. 2014. № 14. С. 443-446.

3. Патякин В.И., Тишин Ю.Г., Базаров С.М. Техническая гидродинамика древесины. М.: Лесн. пром-сть, 1990. 300 с.

4. Костин И.В. Повышение эффективности использования тонкомерной мягколиственной древесины путем обоснования технологии центробежного обезвоживания и пропитки: дис. … канд. техн. наук. СПб., 2011.

5. Григорьев Г.В., Хитров Е.Г., Есин Г.Ю., Гумерова О.М. Кинетика насыщения древесины жидкостью при центробежной пропитке // Изв. С.-Петерб. лесотехн. акад. 2013. № 203. С. 108-116.

6. Куницкая О.А., Есин Г.Ю., Хитров Е.Г., Бурмистрова С.С. Экспериментальное исследование кинетики цен

7. тробежной пропитки древесины (на примере березы) // Проблемно-ориентированные исследования процессов инновационного развития региона: материалы всерос. науч.-практической конф. Петр. гос. ун-т. 2013. С. 24-27.

8. Григорьев Г.В. Совершенствование центробежного способа пропитки лиственной древесины: дис. …. канд. техн. наук. Петрозаводск, 2013

9. Григорьев Г.В., Куницкая О.А., Дмитриева И.Н. Совершенствование центробежного способа пропитки лиственной древесины: науч. изд. СПб., 2015.

10. Grigorev I.V., Grigorev G.V., Nikiforova A.I., Kunitckaia O.A., Dmitrieva I.N., Khitrov E.G., Pásztory Z. Experimental study of impregnation birch and aspen samples. BioResources. 2014. Т. 9, № 4. С. 7018-7026.

11. Куницкая О.А. Обоснование направлений диверсификации обработки низкотоварной древесины на комплексных лесопромышленных предприятиях с использованием инновационных технологий: науч. издание. СПб., 2015.

12. Гончаров Ю.А., Дмитриева И.Н., Григорьев Г.В. Результаты исследований равномерности центробежной пропитки древесины с учетом процентного соотношения зон ранней и поздней древесины // Леса России в XXI веке: материалы одиннадцатой междунар. науч.-технической интернет-конф., посвящ. 85 -летию Лесоинж. фак-та СПбГЛТУ и 95 -летию каф. Сухопутного транспорта леса. 2014. С. 83-85.

13. Гончаров Ю.А., Григорьев Г.В., Дмитриева И.Н. Модель процесса пропитки древесины центрифугированием с учетом вязкости пропиточной жидкости // Научное обозрение. 2014. № 10-1. С. 114-117.

14. Гончаров Ю.А., Куницкая О.А., Григорьев Г.В., Дмитриева И.Н. Экспериментальные исследования процесса пропитки древесины сосны в поле центробежных сил с учетом соотношения зон ранней и поздней древесины // Инженерный вестник Дона. 2014. Т. 30, № 3. С. 56.

15. Bramhall G. The validity of Darcy's law in the axial penetration of wood. Wood Sci. Technol. 1971, № 5 (2). P. 121–134.

16. Drain A., Taverdet J. L., Vergnaud J. M. 1988. Modeling the kinetics of moisture adsorption by wood. Wood Sci. Technol. 1974. № 22. P. 11–20.

17. Rashmi R., Maji T.K. Studies of properties of rubber wood with impregnation of polymer. Bull. Mater. Sci., 2002. Vol. 25. № 6, November 2002, P. 527–531. Indian Academy of Sciences.

18. Stamm A.J. Penetration of Hardwoods by Liquids. Wood Sci. and Tehnol. 1973. Vol. 7, № 4. P. 285-296.

19. Kelso W.C., Gertjejausen R.O., Mossfeld R.L. The effect of air blockade upon the Permeability of Wood to liquids // Univ. Minn. Agr. Exp. Sta. Teach. Bull. 1963. № 242. P. 210.

20. Sucoff E.J., Chen P.Y. S., Hossfeld R.L. Permeability of Unseasoned Xylem of Northern white cedar // Forest. Prood. J. 1965. Vol. 15, № 8. P. 321-324.

21. Prak A.L. Unsteady – State Gas Permeability of Wood // Wood Sci. and Technol. 1970. Vol. 4, № 1. P. 50-69.

22. Resch A. Unsteady – State Flow of Compressible Fluid through Wood // For. Prood. J. 1967. Vol.17, № 3. P. 48-54.

References

1. Grigorev I., Khitrov E., Kalistratov A., Bozhbov V., Ivanov V. New approach for forest production stocktaking based on energy cost. V sbornike: International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM 14. 2014. P. 407-414.

2. Grigorev I., Nikiforova A., Khitrov E., Ivanov V., Gasparian G. Softwood harvesting and processing problem in Russian Federation // International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM. 2014. № 14. P. 443-446.

3. Patyakin V.I., Tishin YU.G., Bazarov S.M. Technical wood hydrodynamics. M.: Lesn. prom-st', 1990. 300 p.

4. Kostin I.V. The improved utilization of small-diameter softwood timber by way of substantiation of the technology of centrifugal dewatering and impregnation: dis. … kand. tekhn. nauk. SPb., 2011.

5. Grigor'ev G.V., Hitrov E.G., Esin G.YU., Gumerova O.M. Kinetics of saturation of the wood with the liquid under centrifugal impregnation // Izvestia SPbLTA. 2013. № 203. P. 108-116.

6. Kunickaya O.A., Esin G.YU., Hitrov E.G., Burmistrova S.S. Experimental study of the kinetics of centrifugal impregnation of wood (for example birch) // Problemno-orientirovannye issledovaniya processov innovacionnogo razvitiya regiona: materialy vseros. nauch.-prakticheskoj konf. Petr. gos. un-t. 2013. P. 24-27.

7. Grigor'ev G.V. Improvement of the centrifugal method of impregnation of hardwood: dis. …. kand. tekhn. nauk. Petrozavodsk, 2013.

8. Grigor'ev G.V., Kunickaya O.A., Dmitrieva I.N. Improvement of the centrifugal method of impregnation of hardwood: nauch. izd. SPb., 2015.

9. Grigorev I.V., Grigorev G.V., Nikiforova A.I., Kunitckaia O.A., Dmitrieva I.N., Khitrov E.G., Pásztory Z. Experimental study of impregnation birch and aspen samples. BioResources. 2014. T. 9, № 4. P. 7018-7026.

10. Kunickaya O.A. Substantiation of the directions of diversification of low-commodity wood processing at complex timber enterprises with the use of innovative technologies: nauch. izdanie. SPb., 2015.

11. Goncharov YU.A., Dmitrieva I.N., Grigor'ev G.V. Results of studies of the uniformity of centrifugal impregnation of wood, taking into account the percentage of zones of early and late wood // Lesa Rossii v XXI veke: materialy odinnadcatoj mezhdunar. nauch.-tekhnicheskoj internet-konf., posvyashch. 85 letiyu Lesoinzh. fak-ta SPbGLTU i 95 -letiyu kaf. Suhoputnogo transporta lesa. 2014. P. 83-85.

12. Goncharov YU.A., Grigor'ev G.V., Dmitrieva I.N. Model of wood impregnation process by centrifugation taking into account the viscosity of the impregnating liquid //Science Review. 2014. № 10-1. P. 114-117.

13. Goncharov YU.A., Kunickaya O.A., Grigor'ev G.V., Dmitrieva I.N. Experimental studies of the process of impregnation of pine wood in the field of centrifugal forces, taking into account the ratio of early and late wood zones //Engineering journal o Don. E-journal. 2014. T. 30, № 3. P. 56.

14. Bramhall G. The validity of Darcy's law in the axial penetration of wood. Wood Sci. Technol. 1971, № 5 (2). P. 121-134.

15. Drain A., Taverdet J. L., Vergnaud J. M. 1988. Modeling the kinetics of moisture adsorption by wood. Wood Sci. Technol. 1974. № 22. P. 11-20.

16. Rashmi R., Maji T.K. Studies of properties of rubber wood with impregnation of polymer. Bull. Mater. Sci., 2002. Vol. 25. № 6, November 2002, P. 527-531. Indian Academy of Sciences.

17. Stamm A.J. Penetration of Hardwoods by Liquids. Wood Sci. and Tehnol. 1973. Vol. 7, № 4. P. 285-296.

18. Kelso W.C., Gertjejausen R.O., Mossfeld R.L. The effect of air blockade upon the Permeability of Wood to liquids // Univ. Minn. Agr. Exp. Sta. Teach. Bull. 1963. № 242. P. 210.

19. Sucoff E.J., Chen P.Y. S., Hossfeld R.L. Permeability of Unseasoned Xylem of Northern white cedar // Forest. Prood. J. 1965. Vol. 15, № 8. P. 321-324.

20. Prak A.L. Unsteady - State Gas Permeability of Wood // Wood Sci. and Technol. 1970. Vol. 4, № 1. P. 50-69.

21. Resch A. Unsteady - State Flow of Compressible Fluid through Wood // For. Prood. J. 1967. Vol.17, № 3. P. 48-54.