

УДК 674.048.5

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2018.5.168

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПРОПИТКИ ДРЕВЕСИНЫ В ПЬЕЗОПЕРИОДИЧЕСКОМ ПОЛЕ*О.А. Куницкая¹, д-р техн. наук, доц., проф.**С.С. Бурмистрова², соискатель**Е.Г. Хитров³, доц.**А.Н. Минаев³, д-р техн. наук, проф.*¹Якутская государственная сельскохозяйственная академия, ш. Сергеляхское, 3-й км, д. 3, г. Якутск, Россия, 677007; e-mail: ola.ola07@mail.ru²Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова, ул. Тимирязева, д. 8, г. Воронеж, Россия, 394087; e-mail: sve2091@yandex.ru³Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет им. С.М. Кирова, просп. Институтский, д. 5, Санкт-Петербург, Россия, 194021; e-mail: yegorkhitrov@mail.ru, stl@spbtu.ru

В настоящее время ведутся многочисленные исследования способов модификации древесины в целях получения новых конструкционных и защитных материалов, имеющих лучшие эксплуатационные свойства и технико-экономические показатели их производства по сравнению с существующими материалами аналогичного назначения. Известны способы модификации древесины, позволяющие, например, заменять новым материалом цветные металлы в парах трения, использовать модифицированные материалы на основе древесины для защиты от нейтронных потоков и т. д. Одним из наиболее распространенных способов модификации древесины, наряду с уплотнением, является пропитка ее жидкостями с различными свойствами. Для повышения эффективности процесса пропитки разработаны установки, использующие эффект пьезопериодического поля. Скорость пропитки при этом выше, чем у других известных способов, так как заготовки дополнительно подвергаются воздействию импульсного повышения давления. В ранее разработанных математических моделях работы таких установок не были учтены различия параметров, характеризующих фильтрацию в капиллярах и порах древесины. В ходе реализации разработанной математической модели установлено, что за 25 циклов повышения давления происходит пропитка образца на 25...30 см в зависимости от породы древесины, что с учетом времени цикла, составившего 60 с, свидетельствует, что предложенные конструкции установок для пропитки древесины при помощи гидроудара, а также по принципу давление–сброс–давление превосходят уже известные установки. Результаты реализации модели показывают, что вклады поровой и капиллярной фильтраций сопоставимы, при этом первая протекает несколько медленнее, чем вторая. Перспективным направлением дальнейших исследований считаем опыты для получения дополнительных сведений о проницаемости древесины, отдельно по порам и капиллярам. Новые экспериментальные данные позволят решить задачу оптимизации параметров процесса пропитки в целях получения равномерно пропитанных заготовок за минимальное время обработки.

Ключевые слова: гидроудар, пропитка древесины, заполнение капилляра, модель пористого пространства древесины.

Для цитирования: Куницкая О.А., Бурмистрова С.С., Хитров Е.Г., Минаев А.Н. Математическое моделирование процесса пропитки древесины в пьезопериодическом поле // Лесн. журн. 2018. № 5. С. 168–180. DOI: 10.17238/issn0536-1036.2018.5.168

Введение

Проблеме модификации древесины и получения на ее основе новых материалов с заданными свойствами посвящено большое количество трудов отечественных и зарубежных ученых [9, 12–15]. При этом все более актуальным становится вопрос создания линейки мобильных пропиточных комплексов для оснащения, например, лесных терминалов [1, 2].

Известны следующие способы пропитки деревянных заготовок: вымачивание, пропитка в центробежных установках, пропитка в барокамерах. Указанные способы имеют ряд недостатков [3].

Вымачивание отличается большой длительностью, а при ускорении процесса путем нагревания пропиточной жидкости – значительным энергопотреблением.

Центробежные установки для пропитки, барокамеры имеют сложную конструкцию, но автоматизировать процесс загрузки–выгрузки заготовок невозможно [10].

Объекты и методы исследования

Объектом исследования являются математические модели работы установок, основанных на использовании эффекта пьезопериодического поля для пропитки лесоматериалов и созданных с учетом различия параметров, характеризующих фильтрацию в капиллярах и порах древесины.

Решения дифференциальных уравнений движения фронта пропитки получены с учетом гармонического вида функции повышения давления в установке, а также начального интервала пропитки, без пренебрежения переменным характером давления пропиточной жидкости при выборе начальных условий к решению дифференциальных уравнений движения фронта пропитки.

Результаты исследования и их обсуждение

Для повышения эффективности процесса пропитки древесины разработана установка с использованием гидравлического удара [7], которая имеет простую конструкцию, низкое энергопотребление и возможность механизировать процесс загрузки–выгрузки деревянных заготовок. Скорость пропитки таким способом выше, чем у других известных способов, так как заготовки подвергаются двойному воздействию: импульсному повышению давления, что позволяет получать периодическое силовое поле (рис. 1).

Установка работает следующим образом. Заготовка помещается в тупиковый конец разгонной трубы через загрузочный люк. Насос подает в напорный бак пропиточную жидкость из приемного бака. После того, как жидкость в напорном баке достигает верхнего датчика уровня, запорное устройство открывает путь жидкости на слив, уровень в напорном баке начинает падать, в момент достижения нижнего датчика уровня запорное устройство резко закрывается. При этом в разгонной трубе происходит явление гидроудара.

Ударная волна будет совершать затухающие колебания в разгонной трубе от запорного устройства до торца заготовки. Например, при скорости потока 1 м/с давление в трубе повышается от 1,0 до 1,5 МПа. В это время насос заполняет напорный бак до уровня верхнего датчика и процесс повторяется.

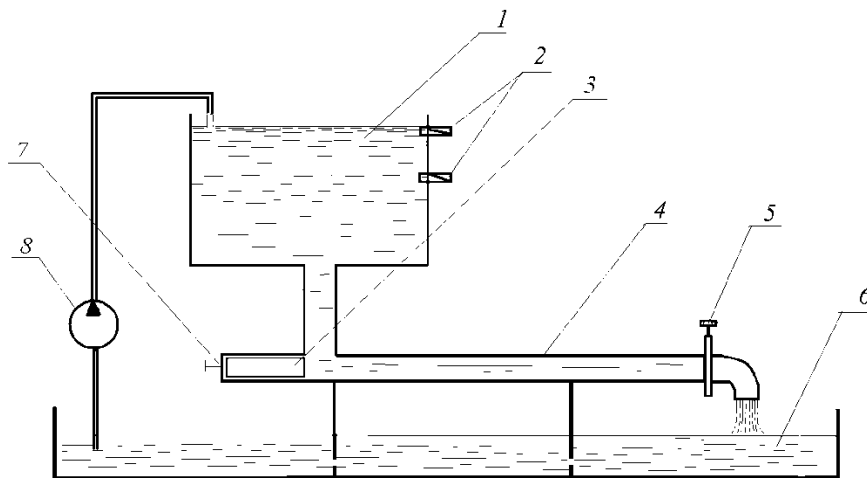


Рис. 1. Установка для пропитки древесины при помощи гидроудара: 1 – напорный бак; 2 – датчики уровня жидкости; 3 – заготовка; 4 – разгонная труба; 5 – запорное устройство; 6 – приемный бак; 7 – загрузочный люк; 8 – насос

Fig. 1. Equipment for impregnation of wood by means of a water hammer: 1 – pressure tank; 2 – liquid level sensors; 3 – wood sample; 4 – accelerating tube; 5 – locking device; 6 – receiving tank; 7 – loading hatch; 8 – pump

Ввиду сложности внутренней структуры древесины при разработке модели пропитки древесины гидроударом задача решается суперпозиционно, как суммарная картина пропитки капиллярного и порового пространства [5].

Рассмотрим заполнение капилляров древесины пропиточной жидкостью. Примем связь скорости фронта пропитки в капилляре u_k с гидравлическим напором в форме закона фильтрации Дарси [8]:

$$\frac{du_k}{dt} = \frac{k_k}{\mu} \Delta p_k, \quad (1)$$

где k_k – коэффициент пропорциональности (коэффициент фильтрации капиллярной структуры);

μ – динамическая вязкость пропиточной жидкости;

Δp_k – градиент гидравлического напора в капиллярах по длине пропитанного участка образца древесины.

Градиент гидравлического напора определим по формуле [8]:

$$\Delta p_k = \frac{p_k(t)}{L_k}, \quad (2)$$

где $p_k(t)$ – давление пропиточной жидкости;

L_k – длина пропитанного участка образца древесины.

В решаемой задаче давление пропиточной жидкости складывается из составляющей, вызванной гидравлическим ударом p , и составляющей, обусловленной давлением поверхностного натяжения жидкости внутри капилляров p_k :

$$p_k(t) = p + p_k. \quad (3)$$

Примем следующую закономерность повышения давления при гидравлическом ударе:

$$p = p_0(1 + A \sin \omega t), \quad (4)$$

где p_0 – среднее давление жидкости в процессе пропитки;

A – амплитуда давления при гидроударе;

ω – частота возмущения;

t – время.

Давление поверхностного натяжения определим по формуле [8]:

$$p_k = \frac{2\sigma}{r_k}, \quad (5)$$

где σ – коэффициент поверхностного натяжения;

r_k – условный радиус капилляра.

Тогда градиент гидравлического удара

$$\Delta p_k = \frac{p_0(1 + A \sin \omega t) + \frac{2\sigma}{r_k}}{L_k}. \quad (6)$$

Запишем уравнение (1) с учетом (6):

$$\frac{du_k}{dt} = \frac{k_k}{\mu} \frac{p_0(1 + A \sin \omega t) + \frac{2\sigma}{r_k}}{L_k}. \quad (7)$$

Длина пропитанного участка L_k определяется с учетом скорости фронта пропитки $\frac{du_k}{dt}$, причем скорость переменна по времени. Тогда, приняв, что L_k равна пути, пройденному фронтом пропитки ко времени t , имеем:

$$L_k = \int_0^t \frac{du_k}{dt} dt. \quad (8)$$

Продифференцируем уравнение (8) по t :

$$\frac{dL_k}{dt} = \frac{du_k}{dt}. \quad (9)$$

Перепишем уравнение (7) относительно L_k с учетом равенства (9):

$$L_k \frac{dL_k}{dt} = \frac{k_k}{\mu} \left\{ p_0(1 + A \sin \omega t) + \frac{2\sigma}{r_k} \right\}. \quad (10)$$

Решим дифференциальное уравнение (10) относительно L_k при начальном условии $L_k(0) = 0$:

$$L_k = \sqrt{\frac{2k_k}{\mu r_k \omega}} \sqrt{p_0 r_k (\omega t + A - A \cos \omega t) + 2\sigma \omega t}. \quad (11)$$

Выразим скорость:

$$\frac{dL_k}{dt} = \sqrt{\frac{k_k r_k \omega}{2\mu}} \frac{p_0(1 + A \sin \omega t) + \frac{2\sigma}{r_k}}{\sqrt{p_0 r_k (\omega t + A - A \cos \omega t) + 2\sigma \omega t}}. \quad (12)$$

Количество жидкости, проходящей через капилляры за единицу времени, найдем, умножив скорость, определенную по формуле (12), на площадь поперечного сечения образца S и долю капилляров от объема образца η_k :

$$\frac{dQ_k}{dt} = S\eta_k \sqrt{\frac{k_k r_k \omega}{2\mu}} \frac{p_0(1 + A \sin \omega t) + \frac{2\sigma}{r_k}}{\sqrt{p_0 r_k (\omega t + A - A \cos \omega t) + 2\sigma \omega t}}. \quad (13)$$

Далее рассмотрим заполнение порового пространства древесины пропиточной жидкостью. В соответствии с рекомендациями [8] запишем связь скорости фронта пропитки с гидравлическим напором в виде следующего уравнения:

$$\frac{du_n}{dt} = \frac{k_n}{\gamma} \Delta p_n, \quad (14)$$

где k_n – коэффициент пропорциональности (коэффициент фильтрации пористой структуры);

γ – удельный вес пропиточной жидкости.

Гидравлический напор Δp_n определим по аналогии с уравнением (2) [8]:

$$\Delta p_n = \frac{p_n(t)}{L_n}, \quad (15)$$

где давление складывается из двух составляющих:

$$p_k(t) = p + p_n. \quad (16)$$

Здесь давление поверхностного натяжения в порах

$$p_n = \frac{2\sigma}{r_n}, \quad (17)$$

где r_n – условный радиус поры.

В итоге для скорости фронта пропитки в порах получим уравнение, аналогичное по структуре уравнению (7):

$$\frac{du_n}{dt} = \frac{k_n}{\gamma} \frac{p_0(1 + A \sin \omega t) + \frac{2\sigma}{r_n}}{L_n}, \quad (18)$$

где длина L_n также связана с производной $\frac{du_n}{dt}$:

$$L_n = \int_0^t \frac{du_n}{dt} dt; \quad (19)$$

$$\frac{dL_n}{dt} = \frac{du_n}{dt}. \quad (20)$$

С учетом соотношения (20) и уравнения (18) запишем уравнение для скорости фронта пропитки в порах:

$$L_n \frac{dL_n}{dt} = \frac{k_n}{\gamma} \left\{ p_0(1 + A \sin \omega t) + \frac{2\sigma}{r_n} \right\}. \quad (21)$$

Решение дифференциального уравнения (21) относительно L_n при начальном условии $L_n(0) = 0$ имеет вид:

$$L_n = \sqrt{\frac{2k_n}{\gamma r_n \omega}} \sqrt{p_0 r_n (\omega t + A - A \cos \omega t) + 2\sigma \omega t}, \quad (22)$$

при этом скорость

$$\frac{dL_n}{dt} = \sqrt{\frac{k_n r_n \omega}{2\gamma}} \frac{p_0 (1 + A \sin \omega t) + \frac{2\sigma}{r_n}}{\sqrt{p_0 r_n (\omega t + A - A \cos \omega t) + 2\sigma \omega t}}. \quad (23)$$

Количество жидкости, проходящей через поры за единицу времени, найдем, умножив скорость, вычисленную по формуле (23), на площадь поперечного сечения образца S и долю пор от объема образца η_n :

$$\frac{dQ_n}{dt} = S \eta_n \sqrt{\frac{k_n r_n \omega}{2\gamma}} \frac{p_0 (1 + A \sin \omega t) + \frac{2\sigma}{r_n}}{\sqrt{p_0 r_n (\omega t + A - A \cos \omega t) + 2\sigma \omega t}}. \quad (24)$$

Время t , используемое при расчете количества жидкости, массы пропиточной жидкости по формулам (24), (26), является управляемым технологическим параметром и определяется количеством циклов повышения и сброса давления в резервуаре за время обработки T .

Суммарная скорость фильтрации жидкости через капиллярное и поровое пространство образца определится как сумма капиллярной и пористой составляющих:

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{dQ_k}{dt} + \frac{dQ_n}{dt}, \quad (25)$$

тогда масса жидкости, впитанной образцом к моменту времени t , – прирост массы

$$\Delta M = \frac{\gamma}{g} \int_0^t \frac{dQ}{dt} dt. \quad (26)$$

Формулы (11), (13), (22), (24), (25) являются основой математической модели пропитки древесины в пьезопериодическом поле. При заданных параметрах функции давления по времени (p_0 , A , ω), свойствах пропиточной жидкости и образца древесины (μ , γ , σ , k_n , k_k , r_n , r_k , η_n , η_k , S) модель позволяет рассчитать главные показатели процесса пропитки – массу и глубину проникновения импрегната в заготовку.

Для дальнейшего исследования примем следующие параметры функции (4): $p_0 = 0,85$ МПа; $A = 1$; $\omega = 2\pi N/T$ (где N – число циклов повышения давления; T – общее время пропитки), а также $N = 25$; $T = 60$ с.

При взятии определенных интегралов по формулам (24), (26) $t = 0 \dots 60$ с.

Расчет проведем на примере пропиточной жидкости, близкой по свойствам к воде: $\gamma = 10$ кН/м³; $\mu = 0,002$ Па·с; $\sigma = 0,0727$ Па·м.

Коэффициенты фильтрации ранее определены в опытах по центробежной пропитке, но без разделения на капиллярную и поровую фильтрацию. На настоящем этапе исследования примем $k_n \approx k_k$. Для древесины осины, березы и ольхи коэффициент составит соответственно $1,3 \cdot 10^{-13}$; $1,6 \cdot 10^{-13}$; $1,25 \cdot 10^{-13}$ м². Размерные характеристики пор и капилляров, а также их объемные доли примем по [8]: $\eta_n = 0,5$; $\eta_k = 0,2$; $r_n = 250$ мкм; $r_k = 2,45$ мкм. Сечение образца – прямоугольное, площадь сечения – 25 см².

Все величины подставляются в расчетные зависимости в единицах СИ.

Результаты расчетов для березового образца представлены на рис. 2.

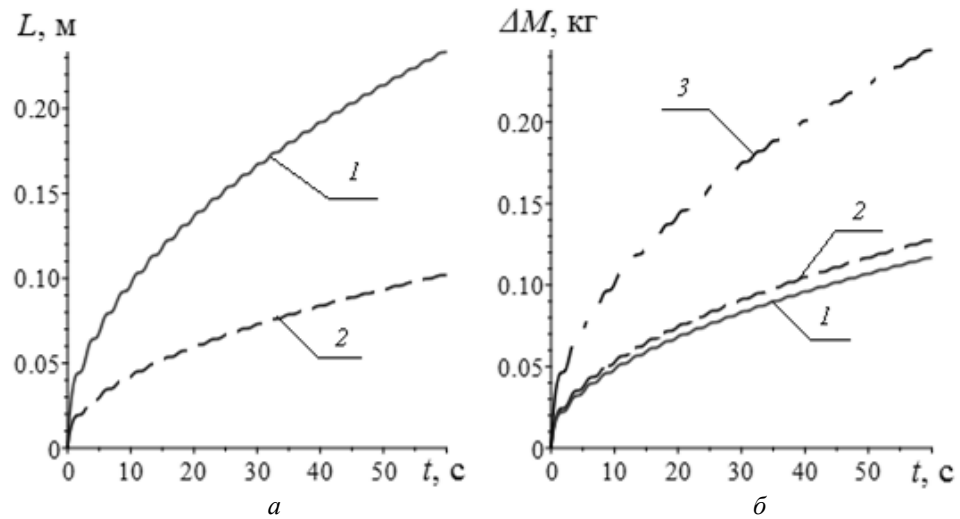


Рис. 2. Пропитка березового образца: *a* – глубина пропитки, *б* – прирост массы; *1* – капиллярная составляющая, *2* – поровая составляющая, *3* – суммарное значение
 Fig. 2. Impregnation of a birch sample: *a* – depth of impregnation, *b* – mass gain; *1* – capillary component, *2* – pore component, *3* – total value

Результаты реализации модели показывают, что вклады поровой и капиллярной фильтрации сопоставимы, при этом фильтрация в порах происходит несколько медленнее, чем в капиллярах. Здесь возникает отдельная задача исследования равномерности пропитки и обоснования оптимальных режимов пропитки в целях получения качественно пропитанных заготовок при минимальном времени обработки. В связи с этим считаем перспективным направлением дальнейших исследований проведение опытов, направленных на получение дополнительных сведений о проницаемости древесины, отдельно по порам и капиллярам.

Характер кривых на рис. 2 показывает, что при организации исследований следует исходить из планов многофакторного эксперимента, подразумевающих возможность получения поверхностей отклика анализируемой величины (глубины пропитки или массы впитанного импрегната) в виде полиномов второго порядка, как это было сделано при изучении изменения фильтрационной способности лесных почв [11].

Расчеты показывают, что за 25 циклов повышения давления происходит пропитка образца на 25...30 см в зависимости от породы древесины, что с учетом времени цикла, составившего в расчете 60 с, доказывает, что предложенная конструкция установок для пропитки древесины при помощи гидроудара по своим потенциальным свойствам превосходит известные образцы.

Рассмотрим еще один способ пропитки, базирующийся на сходных с гидроударным предпосылках. Предварительные исследования показали, что эффективной также является пропитка древесины в пьезопериодическом поле в режиме вакуум–давление–вакуум–давление. Капиллярно-пористую систему водопроводящих путей древесины можно рассматривать как бигидравлическую структуру, в которой гидравлическое сопротивление пористой структуры существенно превышает гидравлическое сопротивление капиллярной. Поэтому можно допустить, что под давлением происходит заполнение пропи-

точной жидкостью капиллярной структуры, а при вакууме – удаление сжатого воздуха через пористую структуру.

Известен автоклавный способ пропитки древесины по методу давление–сброс–давление. Второе предлагаемое пропиточное устройство работает по этому принципу [4, 6]. В пропиточную емкость помещаются пропитываемые деревянные изделия (изделие). Размер пропиточной емкости может быть разным, в зависимости от требуемой производственной мощности установки. Из резервной доливочной емкости пропиточная емкость заполняется полностью. Включается гидронасос, и гидроцилиндр перемещает поршень гидроаккумулятора, создавая давление в пропиточной емкости. Когда поршень доходит до крайне правого положения, происходит переключение гидрораспределителя и поршни гидроцилиндра и гидроаккумулятора перемещаются в обратную сторону, создавая разрежение в пропиточной емкости. Затем гидрораспределитель переключает гидроцилиндр на надвигание, вновь создавая давление в пропиточной емкости.

Устройство обеспечивает автоматизированную циклическую последовательность сжатия–разряжения, за счет чего достигается более качественная (глубокая) пропитка изделий.

Для разработки математической модели процесса пропитки древесины в предлагаемом устройстве рассмотрим заполнение продольной капиллярно-пористой структуры. С учетом условия симметрии пропитки через торцовые сечения движение жидкости в эквивалентном капилляре представим уравнением [8]:

$$\frac{du_k}{dt} = \frac{p + \frac{2\sigma}{r_k} + p_0 \frac{l_0}{(l_0 - L)}}{L}, \quad (27)$$

где p – создаваемое избыточное давление;

p_0 – начальное давление в пропиточной камере;

l_0 – половина длины пропитываемого изделия.

С учетом (5) получаем:

$$L \frac{dL}{dt} = \frac{k_k}{\mu} \left[p + \frac{2\sigma}{r_k} + p_0 \frac{l_0}{l_0 - L} \right]. \quad (28)$$

При начальном вакууме в камере уравнение упрощается:

$$L \frac{dL}{dt} = \frac{k_k}{\mu} \left[p + \frac{2\sigma}{r_k} \right]. \quad (29)$$

Запишем решение уравнения (29) при начальном условии $L(0) = 0$:

$$L = \sqrt{\frac{2k_k (pr_k + 2\sigma)}{\mu r_k}} t^{\frac{1}{2}}, \quad (30)$$

откуда время выдержки изделия под давлением

$$t_1 = \frac{L^2 \mu r_k}{2k_k (pr_k + 2\sigma)}. \quad (31)$$

После снятия давления следует вакуум, при котором скорость истечения сжатого воздуха через пористую структуру древесины можно оценить по уравнению [8], а время выдержки под вакуумом – по [12]:

$$\frac{du}{dt} = \frac{k_n}{\gamma_b l_0} p; \quad (32)$$

$$t_2 = \frac{l_0^2 \gamma_b}{k_n} p, \quad (33)$$

где γ_b – удельный вес воздуха в порах древесины.

После этого следует операция давления, в результате которой происходит заполнение пористого пространства древесины в соответствии с уравнением [8]:

$$L^2 = \frac{2k}{\gamma_b} pt, \quad (34)$$

причем время выдержки для этой операции

$$t_3 = \frac{L^2 \gamma_b}{2k_n} \frac{1}{p}. \quad (35)$$

Суммарное время цикла пропитки

$$T = t_1 + t_2 + t_3. \quad (36)$$

Выводы

1. Расчет параметров процесса пропитки древесины при помощи гидроудара следует рассматривать суперпозиционно, как сумму поровой и капиллярной составляющих. Предлагаемая математическая модель основана на зависимостях (11), (13), (22), (24), (25), учитывающих параметры гидравлического удара (повышение давления, амплитуду и частоту), пропиточной жидкости и древесины (вязкость и удельный вес импрегната, поверхностное натяжение, коэффициенты фильтрации капиллярного и порового пространства, радиусы пор и капилляров, доли объема образца, приходящиеся на поры и капилляры). При заданных параметрах модель позволяет рассчитать главные показатели процесса пропитки – массу и глубину проникновения импрегната в заготовку.

2. В ходе реализации математической модели установлено, что за 25 циклов повышения давления происходит пропитка образца на 25...30 см в зависимости от породы древесины, что с учетом времени цикла, составившего в расчете 60 с, показывает, что предложенные в работе конструкции установок для пропитки древесины при помощи гидроудара, а также по принципу давление–сброс–давление, превосходят известные модели, предназначенные для этих целей.

3. С учетом результатов реализации модели при организации исследований следует исходить из планов многофакторного эксперимента, подразумевающих возможность получить поверхности отклика изучаемой величины (глубины пропитки или массы впитанного импрегната) в виде полиномов второго порядка.

4. Результаты реализации модели показывают, что вклады поровой и капиллярной фильтрации сопоставимы, при этом фильтрация в порах происходит несколько медленнее, чем в капиллярах. Перспективным направлением дальнейшей работы считаем получение дополнительных сведений о проницаемости древесины отдельно по порам и капиллярам. Новые эксперименталь-

ные данные позволят решить задачу оптимизации параметров процесса пропитки в целях получения равномерно пропитанных заготовок за минимальное время обработки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Григорьев И.В. Технологические процессы лесосечных работ с углубленной обработкой древесины // Февральские чтения: сб. материалов науч.-практ. конф. проф.-преп. состава Сыктывкар. лесн. ин-та по итогам НИР в 2015 г. Сыктывкар, 16–19 февр. 2016 г. Сыктывкар: СЛИ, 2016. С. 121–126.
2. Григорьев И.В. Повышение эффективности освоения лесосечного фонда малой концентрации // Повышение эффективности лесного комплекса: материалы Второй всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием, посвященной 65-летию высш. лесн. образования в Республике Карелия, Петрозаводск, 24 мая 2016 г. Петрозаводск: ПетрГУ, 2016. С. 62–65.
3. Куницкая О.А. Моделирование различных способов пропитки древесины полимерами // Вестн. МГУЛ–Лесн. вестн. 2011. № 3. С. 131–135.
4. Куницкая О.А. Обоснование направлений диверсификации обработки низкотоварной древесины на комплексных лесопромышленных предприятиях с использованием инновационных технологий. СПб.: СПбГЛТУ, 2015. 250 с.
5. Куницкая О.А., Базаров С.М., Ржавцев А.А., Григорьев И.В. Конструкция и теория расчета установки для пропитки древесины вязкотекучими компонентами в пьезопериодическом поле // Справ. Инженер. журн. с приложением. 2011. № 1. С. 41–43. Режим доступа: https://elibrary.ru/title_about.asp?id=8233 (дата обращения: 01.06.18)
6. Куницкая О.А., Бурмистрова С.С., Тихонов И.И., Григорьев И.В. Устройство для пропитки древесины: пат. на полезную модель. № 119283; опубл. 20.08.2012.
7. Куницкая О.А., Ржавцев А.А., Григорьев И.В., Соколова В.А. Устройство для пропитки деревянных заготовок: пат. на полезную модель. № 91927; опубл. 10.03.2010.
8. Пятакин В.И., Тишин Ю.Г., Базаров С.М. Техническая гидродинамика древесины. М.: Лесн. пром-сть, 1990. 304 с.
9. Baar J., Pařil P., Rozbořil T., Kúdela J. Colour Stability of Chemically Modified Oak Wood – Nanoiron and Ammonia Treatment // Proceedings of the “Eco-Efficient Resource Wood with Special Focus on Hardwoods”, Sopron, September 8–9, 2016. Sopron, Hungary, 2016. Pp. 35–36.
10. Grigorev I.V., Grigorev G.V., Nikiforova A.I., Kunitckaia O.A., Dmitrieva I.N., Khitrov E.G., Pásztor Z. Experimental Study of Impregnation Birch and Aspen Samples // BioResources. 2014. Vol. 9, iss. 4. Pp. 7018–7026. Режим доступа: https://bioresources.cnr.ncsu.edu/wp-content/uploads/2016/06/BioRes_09_4_7018_Vladislavovich_VIANGP_Exper_Impreg_Birch_Aspen_6136.pdf (дата обращения: 06.10.2014).
11. Lisov V.Yu., Grigorev I.V. Determination Coefficient Filtration of Forest Soil // Proceedings of the IV International Research and Practice Conference “European Science and Technology”, Munich, April 10–11, 2013. Munich, Germany: Vela Verlag Waldkraig, 2013. Vol. I. Pp. 268–274.
12. Pařil P., Brabec M., Maňák O., Rousek R., Rademacher P., Čermák P., Dejmal A. Comparison of Selected Physical and Mechanical Properties of Densified Beech Wood Plasticized by Ammonia and Saturated Steam // European Journal of Wood and Wood Products. 2014. Vol. 72, iss. 5. Pp. 583–591.
13. Pařil P., Dejmal A. Moisture Absorption and Dimensional Stability of Poplar Wood Impregnated with Sucrose and Sodium Chloride // Maderas. Ciencia y tecnología. 2014. Vol. 16, no. 3. Pp. 299–311.

14. Rademacher P., Pařil P., Baar J., Āermák P., Rousek R., Meier D., Koch G., Schmitt U. Improvement of Wood Properties due to Impregnation of Wood with Renewable Liquids from Different Process Residues of Native Origin // Proceedings of the First COST Action FP1307 International Conference – Life Cycle Assessment, EPDs, and Modified Wood, Koper, August 25–26, 2015. Koper, Slovenia, 2015. Pp. 28–30.

15. Sablik P., Giagli K., Pařil P., Baar J., Rademacher P. Impact of Extractive Chemical Compounds from Durable Wood Species on Fungal Decay after Impregnation of Nondurable Wood Species // European Journal of Wood and Wood Products. 2016. Vol. 74, iss. 2. Pp. 231–236.

Поступила 01.06.18

UDC 674.048.5

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2018.5.168

Mathematical Modeling of Impregnation of Wood in Piezo Periodic Field

*O.A. Kunitskaya*¹, Doctor of Engineering Sciences, Professor

*S.S. Burmistrova*², External Postgraduate Student

*E.G. Khitrov*³, Associate Professor

*A.N. Minaev*³, Doctor of Engineering Sciences, Professor

¹Yakut State Agricultural Academy, sh. Sergelyakhskoye 3 km., 3. Yakutsk, 677007, Russian Federation; e-mail: ola.ola07@mail.ru

²Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, ul. Timiryazeva, 8, Voronezh, 394087, Russian Federation; e-mail: sve2091@yandex.ru

³Saint-Petersburg State Forest Technical University named after S.M. Kirov, pr. Institutskiy, 5, Saint-Petersburg, 194021, Russian Federation; e-mail: yegorkhitrov@mail.ru, stl@spbftu.ru

Nowadays much research has been done on the methods of wood modification aimed at obtaining new structural and protective materials which have better serviceability and technical and economic features of production in comparison with available materials of similar purposes. There are known methods for modifying wood, which allow replacing non-ferrous metals in friction couples and using modified wood-based materials for protection against neutron fluxes, etc. One of the most common ways of modifying wood along with compaction is impregnating by liquids with different properties. Equipment based on the piezo periodic field effect for efficiency improvement of wood impregnation was created. The impregnation rate is higher in comparison with the other known methods since the samples are additionally exposed to pulse pressure intensification. The difference of parameters describing the filtration in wood capillaries and pores were not taken into account in previously developed mathematical models of operation of such equipment. The implementation of the developed mathematical model discovered that after 25 cycles of pressure increasing the sample will be impregnated by 25–30 cm depending on wood species. The process takes 60 seconds. This shows that the proposed designs of equipment for impregnation of wood with the use of water hammer as well as pressure – discharge – pressure principle exceed already known equipment. The results of the model implementation show that contributions of filtration in pores and capillaries are comparable. The filtration in pores is not as fast as in capillaries. We consider experiments aimed at obtaining additional data on wood permeability separately in pores and capillaries as a promising area for the further research. New experimental data will allow solving the issue of impregnation optimization in order to obtain uniformly impregnated samples in a minimum of treatment time.

For citation: Kunitskaya O.A., Burmistrova, S.S., Khitrov E.G., Minaev A.N. Mathematical Modeling of Impregnation of Wood in Piezo Periodic Field. *Lesnoy Zhurnal* [Forestry Journal], 2018, no. 5, pp. 168–180. DOI: 10.17238/issn0536-1036.2018.5.168

Keywords: water hammer, impregnation of wood, capillary filling, model of pore space of wood.

REFERENCES

1. Grigor'yev I.V. Tekhnologicheskiye protsessy lesosechnykh rabot s uglublennoy obrabotkoy drevesiny [Technological Processes of Logging Operations with Advanced Wood Processing]. *Fevral'skiye chteniya: sb. materialov nauch.-prakt. konf. prof.-prep. sostava Syktyvkar. lesn. in-ta po itogam NIR v 2015 g. Syktyvkar, 16–19 fevr. 2016* [February readings. Proceedings of the Sci.-Pract. Conf. of the Faculty of the Syktyvkar Forest Institute According to the Research Work Results in 2015, Syktyvkar, February 16–19, 2016]. Syktyvkar, SLI Publ., 2016, pp. 121–126.
2. Grigor'yev I.V. Povysheniye effektivnosti osvoyeniya lesosechnogo fonda maloy kontsentratsii [Improving of Logging Efficiency of Merchantable Volume of Low Concentration]. *Povysheniye effektivnosti lesnogo kompleksa: materialy Vtoroy vseros. nauch.-prakt. konf. s mezhdunar. uchastiyem, posvyashchennoy 65-letiyu vyssh. lesn. obrazovaniya v Respublike Kareliya Petrozavodsk, 24 maya 2016 g.* [Improving of Efficiency of the Forest Complex. Proceedings of the Second National Russian Sci.-Pract. Conf. with International Part., Dedicated to the 65th Anniversary of Higher Forest Education in the Republic of Karelia, Petrozavodsk, May 26, 2016], Petrozavodsk, PetrGU Publ., 2016, pp. 62–65.
3. Kunitskaya O.A. Modelirovaniye razlichnykh sposobov propitki drevesiny polimerami [Modeling of Different Methods of Wood Impregnation with Polymers]. *Lesnoy Vestnik* [Forestry Bulletin], 2011, no. 3, pp. 131–135.
4. Kunitskaya O.A. *Obosnovaniye napravleniy diversifikatsii obrabotki nizkoto-varnoy drevesiny na kompleksnykh lesopromyshlennykh predpriyatiyakh s ispol'zovaniyem innovatsionnykh tekhnologiy* [Objectivation of the Diversification Directions of Low-Grade Wood Processing at the Integrated Forest Enterprises with the Use of Innovative Technologies]. Saint Petersburg, SPbGLTU Publ., 2015. 250 p. (In Russ.)
5. Kunitskaya O.A., Bazarov S.M., Rzhavtsev A.A., Grigor'yev I.V. Konstruktsiya i teoriya rascheta ustanovki dlya propitki drevesiny vyzkotekuchimi komponentami v p'yezo pole [Design and Calculating Theory of the Equipment for Impregnation of Viscous-Flow Components in Piezo Shock Field]. *Spravochnik. Inzhenernyi zhurnal* [Handbook. An Engineering Journal]. 2011, no. 1, pp. 41–43. Available at: https://elibrary.ru/title_about.asp?id=8233 (accessed 01.06.18)
6. Kunitskaya O.A., Burmistrova S.S., Tikhonov I.I., Grigor'yev I.V. *Ustroystvo dlya propitki drevesiny* [Device for Impregnation of Wood]. Useful Model Patent. No. 119283. Published 20.08.2012.
7. Kunitskaya O.A., Rzhavtsev A.A., Grigor'yev I.V., Sokolova V.A. *Ustroystvo dlya propitki derevyannykh zagotovok* [Device for Impregnation of Wood]. Useful Model Patent. No. 91927. Published 10.03.2010.
8. Patyakin V.I., Tishin Yu.G., Bazarov S.M. *Tekhnicheskaya gidrodinamika drevesiny* [Technical Hydrodynamics of Wood]. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1990. 304 p. (In Russ.)
9. Baar J., Pařil P., Rozbořil T., Kúdela J. Colour Stability of Chemically Modified Oak Wood – Nanoiron and Ammonia Treatment. *Proceedings of the "Eco-Efficient Resource Wood with Special Focus on Hardwoods". Sopron, September 8–9, 2016*. Sopron, Hungary, 2016, pp. 35–36.
10. Grigorev I.V., Grigorev G.V., Nikiforova A.I., Kunitckaia O.A., Dmitrieva I.N., Khitrov E.G., Pásztor Z. Experimental Study of Impregnation Birch and Aspen Samples. *BioResources*, 2014, vol. 9, iss. 4, pp. 7018–7026. Available at: https://bioresources.cnr.ncsu.edu/wp-content/uploads/2016/06/BioRes_09_4_7018_Vladislavovich_VIANGP_Exp_Impreg_Birch_Aspen_6136.pdf (accessed 06.10.2014).

11. Lisov V.Yu, Grigorev I.V. Determination Coefficient Filtration of Forest Soil. *Proceedings of the IV International Research and Practice Conference "European Science and Technology", Munich, April 10–11, 2013*. Munich, Germany, Vela Verlag Waldkraigburg, 2013, vol. I, pp. 268–274.
12. Pařil P., Brabec M., Maňák O., Rousek R., Rademacher P., Āermák P., Dejmal A. Comparison of Selected Physical and Mechanical Properties of Densified Beech Wood Plasticized by Ammonia and Saturated Steam. *European Journal of Wood and Wood Products*, 2014, vol. 72, iss. 5, pp. 583–591.
13. Pařil P., Dejmal A. Moisture Absorption and Dimensional Stability of Poplar Wood Impregnated with Sucrose and Sodium Chloride. *Maderas. Ciencia y tecnología*, 2014, vol. 16, no. 3, pp. 299–311.
14. Rademacher P., Pařil P., Baar J., Āermák P., Rousek R., Meier D., Koch G., Schmitt U. Improvement of Wood Properties due to Impregnation of Wood with Renewable Liquids from Different Process Residues of Native Origin. *Proceedings of the First COST Action FP1307 International Conference – Life Cycle Assessment, EPDs, and Modified Wood, Koper, August 25–26, 2015*. Koper, Slovenia, 2015, pp. 28–30.
15. Sablík P., Giagli K., Pařil P., Baar J., Rademacher P. Impact of Extractive Chemical Compounds from Durable Wood Species on Fungal Decay after Impregnation of Non-durable Wood Species. *European Journal of Wood and Wood Products*, 2016, vol. 74, iss. 2, pp. 231–236.

Received on June 01, 2018
