

## СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

УДК 674.048.5

DOI: 10.18324/2077-5415-2019-2-73-79

### Моделирование пропитки древесины с предварительной сушкой

Г.Н. Колесников<sup>1a</sup>, А.В. Кантышев<sup>1b</sup>, Т.А. Гаврилов<sup>1c</sup>, О.А. Куницкая<sup>2d</sup>, И.В. Григорьев<sup>2e</sup>

<sup>1</sup>Петрозаводский государственный университет, пр. Ленина 33, Петрозаводск, Республика Карелия, Россия

<sup>2</sup>Якутская государственная сельскохозяйственная академия, ш. Сергеляхское 3, Якутск, Республика Саха, Россия

<sup>a</sup>kgn@petrsu.ru, <sup>b</sup>kantyshev.a@yandex.ru, <sup>c</sup>gavrilovta@yandex.ru, <sup>d</sup>ola.ola07@mail.ru, <sup>e</sup>silver73@inbox.ru

<sup>a</sup><https://orcid.org/0000-0001-9694-0264>,

<sup>b</sup><https://orcid.org/0000-0001-8657-4547>,

<sup>c</sup><https://orcid.org/0000-0003-3671-0971>,

<sup>d</sup><https://orcid.org/0000-0001-8542-9380>,

<sup>e</sup><https://orcid.org/0000-0002-5574-1725>

Статья поступила 15.03.2019, принята 21.04.2019

*Уменьшение влажности древесины при сушке, как известно, сопровождается экстрагированием фурфурола, формальдегида и других соединений, что оказывает негативное техногенное воздействие на окружающую среду. Косвенно оценить закономерности данного воздействия можно, моделируя изменение влажности древесины в зависимости от продолжительности сушки. В данной работе сушка рассматривается в комплексе с последующей пропиткой древесины и, соответственно, предлагаются варианты математических моделей процессов сушки и пропитки. С использованием моделей показано, если относительная влажность древесины после предварительной сушки находится в интервале от 5 до 40 %, то функция скорости пропитки имеет экстремум. Получены количественные оценки, подтверждающие, что интенсивность процессов сушки и пропитки наиболее высока в начальной их стадии и быстро уменьшается с течением времени. Адекватность результатов моделирования подтверждена их согласованностью с выводами известных по литературе экспериментальных и теоретических исследований. С учетом этих закономерностей обосновано, что для повышения эффективности защитной обработки древесины по рассматриваемой технологии необходимо минимизировать интервал времени между завершением предварительной сушки и началом пропитки. Как следствие, учет данного обстоятельства при совершенствовании технологий и оборудования позволит уменьшить затраты времени, а значит, и энергии на пропитку древесины с предварительной сушкой. Перспективы исследования связаны с учетом различий древесины ядровых и безъядровых пород. Реализованный подход к построению моделей сушки и пропитки может быть адаптирован к анализу других капиллярно-пористых материалов в целях повышения эффективности технологий их промышленной переработки и экологической безопасности.*

**Ключевые слова:** сушка и пропитка древесины; техногенное воздействие; моделирование; эффективность сушки с предварительной пропиткой.

### Simulation of pre-dried wood impregnation

G.N. Kolesnikov<sup>1a</sup>, A.V. Kantyshev<sup>1b</sup>, T.A. Gavrilov<sup>1c</sup>, O.A. Kunitskaya<sup>2d</sup>, I.V. Grigoriev<sup>3e</sup>

<sup>1</sup>Petrozavodsk State University; 33, Lenin Ave., Petrozavodsk, Russia

<sup>2</sup>Yakutsk State Agricultural Academy; 3rd km, 3, Sergelyakhskoe Highway, Yakutsk, Russia

<sup>a</sup>kgn@petrsu.ru, <sup>b</sup>kantyshev.a@yandex.ru, <sup>c</sup>gavrilovta@yandex.ru, <sup>d</sup>ola.ola07@mail.ru, <sup>e</sup>silver73@inbox.ru

<sup>a</sup><https://orcid.org/0000-0001-9694-0264>,

<sup>b</sup><https://orcid.org/0000-0001-8657-4547>,

<sup>c</sup><https://orcid.org/0000-0003-3671-0971>,

<sup>d</sup><https://orcid.org/0000-0001-8542-9380>,

<sup>e</sup><https://orcid.org/0000-0002-5574-1725>

Received 15.03.2019, accepted 21.04.2019

*The decrease in wood moisture during drying, as it is known, is accompanied by the extraction of furfural, formaldehyde, and other compounds, which has a negative anthropogenic impact on the environment. Indirectly, it is possible to evaluate the patterns of this effect by simulating a change in the moisture content of wood depending on the duration of drying. In this paper, drying is considered in combination with subsequent impregnation of wood and, accordingly, variants of mathematical models of drying and impregnation processes are proposed. Using the models, it is shown if the relative humidity of the wood after pre-drying is in the range from 5 to 40%, then the function of the impregnation rate has an extremum. Quantitative estimates were obtained, confirming that the intensity*

*of the drying and impregnation processes is highest in their initial stage and quickly decreases with time. The adequacy of the simulation results is confirmed by their consistency with the findings of experimental and theoretical studies known in the literature. Taking into account these regularities, it is justified that in order to increase the effectiveness of protective wood treatment according to the technology in question, it is necessary to minimize the time interval between the completion of pre-drying and the start of impregnation. As a result, while improving technologies and equipment, it will reduce the time and, therefore, energy for impregnation of wood with pre-drying. Prospects for the study are based on the differences in the wood of the core and non-core species. The implemented approach to building models of drying and impregnation can be adapted to the analysis of other capillary-porous materials in order to improve the efficiency of their industrial processing technologies and environmental safety.*

**Keywords:** wood; drying and impregnation; anthropogenic impact; modeling; drying efficiency with pre-impregnation.

## Введение

Необходимым технологическим звеном при подготовке древесных заготовок к дальнейшему использованию являются повышение их огнестойкости и защита от биодеградации. Ряд стандартных способов огне- и биозащитной обработки древесины и материалов на ее основе хорошо известны [1; 2]. Однако проблема экологически безопасной, технологически несложной и экономически целесообразной пропитки древесины сохраняет свою актуальность, что отражено, например, в работах [3–10]. Актуальность проблемы объясняется необходимостью совершенствования технологий, оборудования и веществ, предназначенных для обработки древесины, что требует продолжения исследований с учетом современных требований экологической безопасности и энергоэффективности.

В данной статье внимание фокусируется на двух задачах, которые непосредственно относятся к технологиям сушки и пропитки древесины; при этом постановка и методики решения задач ориентированы на уменьшение затрат энергии и на улучшение экологических характеристик способа пропитки с предварительной конвективной сушкой.

Обращаясь к количественным оценкам энергетической эффективности, заметим, что суммарный расход тепловой и электрической энергии при сушке пиломатериалов в конвективной камере периодического действия по стандартной технологии может составить 1,807 ГДж на 1 м<sup>3</sup> высушиваемой древесины [11]. Экономическую целесообразность продолжения исследований в рассматриваемой области подтверждают результаты работы [11], в которой обосновано, что суммарный расход энергии на сушку может быть уменьшен примерно в два раза, если использовать автоматизированный контроль относительной влажности воздуха в конвективной камере, а также применить рекуператоры и перейти от принудительной циркуляции воздуха к естественной циркуляции. При этом обеспечивается высокое качество сушки пиломатериалов, но продолжительность процесса сушки увеличивается на 20–25 % по сравнению с использованием энергоемкой принудительной циркуляции воздуха.

Рассматривая экологические аспекты процесса сушки, необходимо принимать во внимание следующие обстоятельства.

Как известно, в начальной стадии сушки наиболее интенсивно удаляется свободная (капиллярная) влага, заполняющая в древесине пространство между стенками клеток. По мере уменьшения влажности древесины интенсивность удаления свободной влаги уменьшается, но возрастает интенсивность удаления связанной влаги, т. е. влаги, содержащейся в стенках клеток. Макси-

мальное содержание связанной влаги в древесине составляет около 30 % и мало зависит от породы древесины [12].

При сушке из древесины экстрагируются водорастворимые вещества, в том числе фурфурол и формальдегид, которые наиболее опасны для окружающей среды и человека [13]. По классификации ГОСТ 12.1.007, фурфурол и формальдегид относятся соответственно к умеренно опасным и особо опасным веществам соответственно 3-го и 2-го класса опасности по ГОСТ 12.1.005. Указанные поллютанты выделяются с наибольшей интенсивностью на начальной стадии сушки [13], когда из древесины удаляется свободная влага. Анализ известных по литературе данных указывает на необходимость более детального обсуждения стадий сушки с учетом фактора времени и затрат энергии [11; 13–15].

В данной работе предполагается, что для пропитки используется раствор антипиренов и антисептиков в жидкостях, не образующих пленку на поверхности древесины, но проникающих в ее толщу, вследствие чего формируется приповерхностный защитный слой, т. е., по стандартной терминологии [2], выполняется поверхностная (неглубокая) пропитка. Однако если толщина обрабатываемой заготовки небольшая и соизмерима с глубиной пропитки, то может иметь место частный случай глубокой пропитки; вероятность такого случая возрастает с уменьшением толщины обрабатываемых элементов, которые предназначены для использования в некоторых ограждающих строительных конструкциях [16].

*Целью настоящей работы* является обоснование рекомендаций по совершенствованию технологии поверхностной пропитки с предварительной конвективной сушкой путем уменьшения затрат энергии и улучшения экологических характеристик на основе анализа и обобщения экспериментальных и теоретических данных об особенностях данной технологии на примере осинового и соснового образцов.

**Материалы и методы исследования.** Применение метода системного анализа показало, что для обоснования рекомендаций по совершенствованию технологии пропитки после неполной сушки необходимо более детально исследовать закономерности изменения интенсивности сушки и пропитки. Древесину рассматриваем как капиллярно-пористый материал. В соответствии с целью работы определена ключевая закономерность, выражающаяся в том, что «при отсутствии в древесине свободной влаги количество влаги внутри полостей сосудов, капилляров и пор будет соответствовать ее количеству в окру-

жающей среде, в которой влага находится в газообразном состоянии» [12, с. 30]. Эффективность практического использования данной закономерности подтверждена в работе [11], в которой принято во внимание, что уменьшение относительной влажности воздуха в сушильной камере косвенно отражает уменьшение влажности древесины. Учет данного обстоятельства позволил «автоматизировать процесс контроля влажности древесины без применения специальных датчиков влажности, а также точно фиксировать окончание процесса сушки при достижении древесиной заданной влажности» [11]. В нашей работе указанная выше закономерность принимается во внимание не только при анализе процесса предварительной сушки древесины, но также при моделировании пропитки и обосновании интервала времени между окончанием предварительной сушки и началом пропитки.

Для древесины, как хорошо известно, характерна большая вариабельность физических и механических свойств [13], детальный учет которых в математических моделях сопряжен с большими сложностями, однако они преодолеваются при решении ряда задач, важных для практики [14]. Принимая во внимание цель и задачи работы, а также отмеченную выше естественную вариабельность свойств древесины и известные по литературе [3–15] результаты исследований, при выборе методов математического моделирования процессов сушки и пропитки мы использовали подход, в котором свойства древесины, влияющие на характеристики этих процессов, учитываются в интегральной форме. Такой подход привел к построению моделей, которые отличаются от известных отмеченных выше моделей тем, что позволяют выполнить анализ основных закономерностей сушки и пропитки без использования сложных алгоритмов и большого объема исходных данных.

Разработанные модели сушки и пропитки используются как инструмент прикладного анализа, ориентированного на достижение цели данной работы. При использовании моделей, безусловно, необходимы некоторые количественные исходные данные, которые были получены в экспериментах на осиновых и сосновых образцах с использованием анализатора влажности Shimadzu MOC-120H. Методика и результаты экспериментов опубликованы в [16], однако количественные оценки изменения скорости в моделируемых процессах сушки и пропитки тонкомерных заготовок из осины и сосны не рассматривались.

Моделируя процесс изменения влагосодержания при сушке древесины, рассмотрим образец массой  $M$ . Пусть  $M_b$  — общая масса свободной и связанной влаги в образце (включая экстрагируемые при сушке вещества, указанные выше). С течением времени  $t$  за счет уменьшения влажности значения  $M_b$  и  $M$  уменьшаются на одну и ту же величину  $\Delta M_b$ . Тогда в моменты времени  $t$  и  $(t + \Delta t)$  масса влаги равна соответственно  $M_b$  и  $(M_b - \Delta M_b)$ ; масса образца в те же моменты времени равна  $M$  и  $(M - \Delta M_b)$ . Соответственно, относительная влажность древесины в те же моменты времени равна  $C_b = M_b/M$  и  $C_{b1} = (M_b - \Delta M_b)/(M - \Delta M_b)$ .

С физической точки зрения правомерно предположить, что величина  $\Delta M_b$  пропорциональна  $\Delta t$  и  $M_b$ . Величина  $\Delta M_b$  зависит от температуры, влажности, продолжительности сушки  $t$ , породы древесины и других факторов [3; 4; 15; 18], суммарное влияние которых учтем технологическим параметром модели  $\tau$ . Параметр  $\tau$  имеет размерность времени, его значение определяется с использованием экспериментальных данных [17]. Обозначим  $\Theta = t/\tau$  и  $\Delta\Theta = \Delta t/\tau$ . Тогда  $\Delta M_b = \Delta\Theta M_b$ , и после преобразований получим:  $C_{b1} = (C_b - \Delta\Theta C_b)/(1 - \Delta\Theta C_b)$ . Преобразовав данное соотношение и пренебрегая величинами второго порядка малости, получим приближенное выражение для определения изменения относительной влажности на отрезке времени  $\Delta t = \tau\Delta\Theta$ :  $\Delta C_b = C_{b1} - C_b = -\Delta\Theta C_b(1 - C_b)$ . Точное выражение получим, переходя к пределу при  $\Delta\Theta \rightarrow 0$ :  $dC_b/(C_b(1 - C_b)) = -d\Theta$ . Интегрируя, получим:  $\ln(C_b/(1 - C_b)) = -\Theta + A$ . Константу интегрирования  $A$  найдем из условия, что начальная относительная влажность древесины известна, т. е.  $C_b = C_{b0}$  на старте процесса сушки (при  $\Theta = 0$ ). Тогда после несложных преобразований получим:  $C_b = \exp(-\Theta)/(1/C_{b0} + \exp(-\Theta) - 1)$ . Отметим, что, например, для свежесрубленной древесины относительная влажность  $C_{b0} \approx 0,5$ . Оценивая физическую адекватность данной формулы, необходимо принимать во внимание следующие обстоятельства.

Если продолжительность сушки, а значит, и указанный выше параметр  $\Theta \rightarrow \infty$ , то  $C_b \rightarrow 0$ . Однако, согласно недавно опубликованным данным [15, с. 111], относительная влажность древесины, высушенной с применением стандартных технологий, не может быть меньше  $\sim 1\%$  (или 0,01), т. е. находится в интервале от 0,01 до 1,00. Чтобы учесть данное обстоятельство, дополним правую часть формулы для  $C_b$  поправкой  $\Delta C_b$ , которая зависит от  $\Theta$ , значит, и от уточненного значения относительной влажности  $C_{b1}$ , а именно, поправка равна нулю при  $\Theta = 0$  и равна 0,01 при  $\Theta \rightarrow \infty$ :  $\Delta C_b = 0,01(1 - C_{b1}/C_{b0})$ . Тогда уточненные значения относительной влажности древесины будут равны  $C_{b1} = C_b + \Delta C_b$ , и взамен представленной выше формулы для  $C_b$  можно записать:

$$C_{b1} = \exp(-\Theta)/(1/C_{b0} + \exp(-\Theta) - 1) + 0,01(1 - C_{b1}/C_{b0}).$$

Отсюда, используя приведенное выше выражение  $C_b$ , после преобразований получим расчетную формулу для вычисления уточненных значений относительной влажности  $C_{b1}$  в зависимости от продолжительности сушки  $t = \Theta\tau$ :  $C_{b1} = (C_b + 0,01)/(1 + 0,01/C_{b0})$ .

Соотношение для  $C_{b1}$  продифференцируем по времени, чтобы определить скорость (интенсивность) сушки. Тогда, принимая во внимание приведенные выше выражения для  $\Theta$  и  $C_b$ , получим после преобразований расчетную формулу для определения модуля скорости сушки (*drying*):  $V_d = |dC_{b1}/dt| = C_b(1 - C_b)/(\tau(1 + 0,01/C_{b0}))$ ; данная формула показывает, как быстро убывает относительная влажность древесины при сушке. Визуализация примеров применения формул приведена на рис. 1 и 2. На рис. 1 отражено изменение относительной влажности (в процентном выражении,  $C_{b1} \cdot 100\%$ ) в зависимости от продолжительности сушки при некоторых значениях параметра  $\tau$ . Начальная относительная влажность образцов 38%, сушка выпол-

нялась при температуре 100 °С, методика и результаты эксперимента описаны в [16]. Изменение скорости сушки при тех же условиях показано на рис. 2.

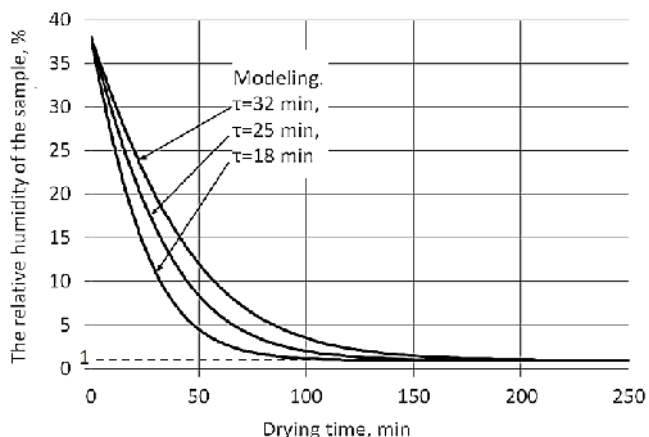


Рис. 1. Изменение относительной влажности древесины в зависимости от продолжительности сушки

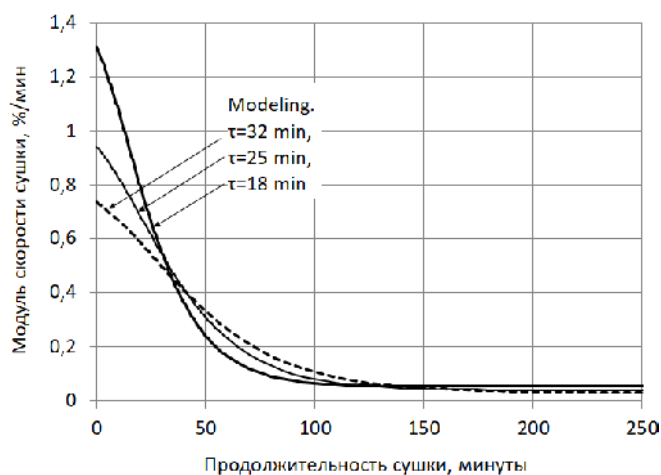


Рис. 2. Изменение скорости сушки в зависимости от времени

Адекватность результатов, представленных на рис. 1, подтверждается их согласованностью с известными данными [12, с. 29], согласно которым сушка заготовок из древесины до влажности 5–7 % продолжалась от 2 до 3 ч, в зависимости от их размеров. Кроме того, согласно представленным на рис. 1 и 2 зависимостям, интенсивность сушки с увеличением продолжительности процесса убывает, что соответствует известной закономерности, отмеченной выше: на начальной стадии сушки наиболее интенсивен перенос свободной (капиллярной) влаги, заполняющей в древесине пространство между стенками клеток; на второй стадии возрастает интенсивность переноса связанной влаги [8]. Удаление связанной влаги из древесины требует больше энергии, поэтому скорость процесса сушки со временем уменьшается. Если указанный технологический параметр  $\tau$  уменьшается, то в рассмотренных случаях (рис. 1 и 2) скорость сушки увеличивается, но только на первой стадии сушки ( $0 < t < 30$  мин), когда испаряется преимущественно свободная влага. На финишной стадии ( $t > 120$  мин), ко-

гда преобладает перенос связанной влаги, скорость (интенсивность) сушки близка к нулю и почти не зависит от параметра  $\tau$ , что согласуется с известными данными о малом влиянии породы древесины на начальное содержание связанной влаги [12].

Таким образом, наиболее чувствительна к изменениям технологических параметров сушки первая стадия сушки, когда доминирует перенос свободной влаги. Как следствие, затраты энергии на сушку также будут наиболее эффективны на данной стадии.

Сушку древесины можно рассматривать как процесс, в определенном смысле обратный по отношению к пропитке. С методологической точки зрения это означает, что модель пропитки может быть построена на основе подхода, аналогичного рассмотренному выше подходу. Однако при пропитке относительная влажность возрастает с увеличением продолжительности данного технологического процесса. Тогда с учетом приведенных выше обозначений можно показать, что  $dC_b/(C_b(1-C_b)) = d\Theta$ , и концентрация пропиточной жидкости  $C_b = C_{bi}$  в древесине определяется формулой  $C_{bi} = (\exp\Theta)/(1/C_{b0} + \exp\Theta - 1)$ .

Заметим также, если  $\Theta \rightarrow \infty$ , то  $C_{bi} \rightarrow 1$ . В пределе, при  $C_{bi} = 1$ , образец формально будет содержать только пропиточную жидкость, что не соответствует реальности. Поэтому, уточняя формулу для  $C_{bi}$ , воспользуемся известными данными об относительной влажности сплавной древесины, принимая, что наибольшее значение  $C_{bi}$  равно 0,8. Тогда уточненную формулу для определения относительной влажности древесины  $C_{bi1}$  при пропитке можно записать в виде функции от  $\Theta$ :  $C_{bi1}(\Theta) = 0,8(\exp\Theta)/(0,8/C_{b0} + \exp\Theta - 1)$ .

Оценивая физическую адекватность данной формулы, необходимо принимать во внимание особенности процесса пропитки древесины как капиллярно-пористого материала. Как показали эксперименты, процесс переноса влаги в древесине включает в себя быструю и медленную стадии, что объясняется различием механизмов переноса свободной и связанной влаги [12]. Обе стадии моделируются приведенным выше соотношением для  $C_{bi}$ , но при различных значениях параметра  $\tau$ : с уменьшением  $\tau$  скорость моделируемого процесса пропитки возрастает. Принимаем  $\tau = \tau_1 = 0,8$  для быстрой стадии и  $\tau = \tau_2 = 20$  для медленной стадии; соответственно,  $\Theta_1 = t/\tau_1$  и  $\Theta_2 = t/\tau_2$ . Влияние каждой из двух стадий учитываем весовыми коэффициентами  $w_1$  и  $w_2$ , значения которых соответствуют указанной выше [12] массовой доле свободной и связанной влаги в древесине:  $w_1 = 0,7$  и  $w_2 = 0,3$ . Тогда взамен  $C_{bi1}$  получим:  $C_{bi2} = w_1 C_{bi1}(\Theta_1) + w_2 C_{bi1}(\Theta_2)$ . Результаты вычислений по данной формуле согласуются с результатами экспериментов [16], что представлено на рис. 3.

Закономерности моделируемого изменения влажности образцов в зависимости от продолжительности сушки  $t$  и начальной влажности  $C_{b0}$  иллюстрирует рис. 4 (здесь значения  $C_b$  определены по приведенной выше формуле для  $C_{bi2}$  и приведены в процентном выражении,  $C_b = C_{bi2} \cdot 100$  %).



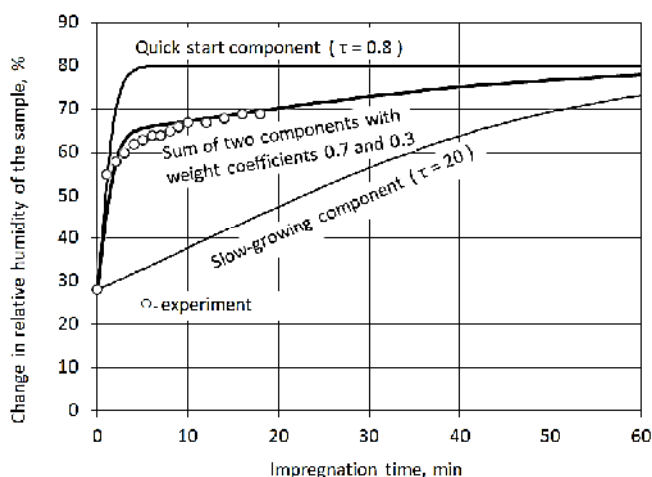


Рис. 3. Увеличение массы образца в зависимости от продолжительности пропитки

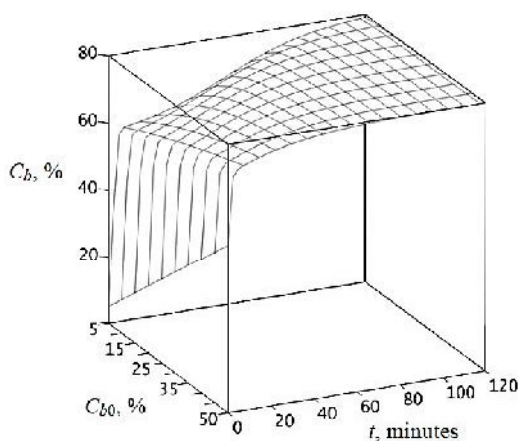


Рис. 4. Изменение влажности древесины в зависимости от продолжительности пропитки  $t$  и начальной относительной влажности  $C_{b0}$

Рис. 3 и 4 показывают, что скорость пропитки уменьшается с увеличением продолжительности пропитки. Количественную характеристику скорости пропитки (*impregnation*)  $V_i$  определим как производную от  $C_{b/2}$  по времени:  $V_i = dC_{b/2}/dt$ . После преобразований с учетом принятых выше обозначений получим:

$$V_i = 0,8((w_1/\tau_1)A_1(1 - A_1) + (w_2/\tau_2)A_2(1 - A_2)),$$

где  $A_1 = \exp(\Theta_1/(0,8/C_{b0} + \exp(\Theta_1) - 1))$ ,  $A_2 = \exp(\Theta_2/(0,8/C_{b0} + \exp(\Theta_2) - 1))$ .

Результаты вычислений по данной формуле представлены в графической форме на рис. 4 (в процентном выражении).

**Результаты исследования.** Результаты математического моделирования (рис. 1–5) и экспериментов (рис. 3) позволили получить количественные оценки, которые дополняют известные представления о том, что процессы сушки и пропитки древесины включают в себя быструю и медленную стадии. Отмеченные особенности и количественные оценки целесообразно принимать во внимание при разработке и совершенствовании технологий пропитки древесины с предвари-

тельной конвективной сушкой. Обосновывая эту рекомендацию, отметим следующее.

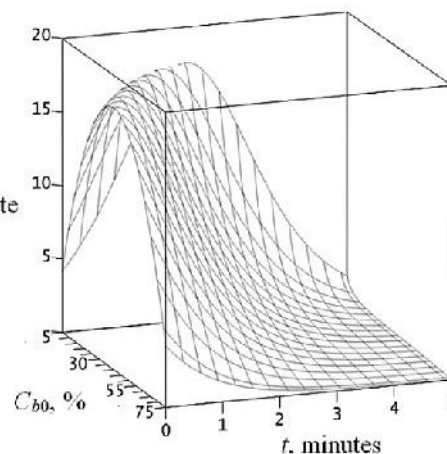


Рис. 5. Изменение скорости пропитки  $V_i$  в зависимости от времени  $t$  и начальной относительной влажности  $C_{b0}$

После завершения сушки древесина интенсивно поглощает влагу из окружающей среды до установления равновесной влажности (рис. 3, 4); скорость поглощения влаги быстро уменьшается (рис. 4). Отсюда следует, что эффективность рассматриваемого способа пропитки будет больше, если уменьшить интервал времени между предварительной конвективной сушкой и последующей пропиткой. Этот эффект целесообразно использовать для уменьшения затрат энергии и времени на пропитку. При этом предварительная сушка может быть неполной. Таким образом, разработанные математические модели пропитки древесины и сушки древесины могут быть использованы как дополнительный инструмент совершенствования рассматриваемой технологии.

Экспериментальное подтверждение данной рекомендации приведено в указанной выше работе [16]. Были выполнены эксперименты по пропитке образцов из древесины осины после предварительной неполной конвективной сушки. В качестве пропиточной жидкости был использован антипирен Medera 200 Cherry с антисептическими свойствами. По результатам экспериментов установлено, что для повышения эффективности пропитки следует предварительно выполнять неполную сушку при температуре 100 °С с потерей от 10 до 20 % влаги и последующей пропиткой способом погружения. Важно подчеркнуть, что интервал времени между завершением неполной сушки и началом пропитки должен быть минимизирован с учетом технологических ограничений и особенностей существующего или модернизируемого оборудования.

Адекватность полученных результатов подтверждается их согласованностью с известными по литературе данными [18; 19] и результатами испытаний [16; 17] осиновых и сосновых образцов.

Ограничения на область применения предложенных моделей сушки и пропитки обусловлены различием свойств древесины ядровых (например, сосна) и безъядровых (например, осина) пород [17; 20]. Результаты моделирования (рис. 1–5) согласуются с экспериментальными данными для образцов из древесины осины и

заболони сосны [16]. Однако чтобы получить столь же адекватные данные при испытаниях ядровой части ствола (например, сосны), необходимо продолжение исследований.

#### Выводы

1. Разработаны варианты математических моделей процессов сушки и пропитки древесины как капиллярно-пористого материала. С использованием моделей показано, что если относительная влажность древесины после предварительной сушки находится в интервале от 5 до 40 %, то функция скорости пропитки имеет экстремум.

2. Получены количественные оценки, подтверждающие, что интенсивность процессов сушки и пропитки наиболее высока в начальной их стадии и быстро уменьшается с течением времени.

3. Адекватность результатов моделирования подтверждена их согласованностью с выводами известных по литературе экспериментальных и теоретических исследований.

4. С учетом исследуемых закономерностей обосновано, что для повышения эффективности защитной обработки древесины по рассматриваемой технологии необходимо минимизировать интервал времени между завершением предварительной сушки и началом пропитки. Как следствие, учет данного обстоятельства при совершенствовании технологий и оборудования позволит уменьшить затраты времени, а значит, и энергии на пропитку древесины с предварительной сушкой.

Перспективы исследования связаны с учетом различий древесины ядровых и безъядровых пород. Реализованный подход к построению моделей сушки и пропитки может быть адаптирован к анализу других капиллярно-пористых материалов в целях повышения эффективности технологий их промышленной переработки и экологической безопасности.

#### Литература

- ГОСТ 20022.6-93 [Электронный ресурс]. Защита древесины. Способы пропитки // Сайт Консорциума «Кодекс». <https://kodeks.ru/> (дата обращения: 20.03.2019).
- ГОСТ Р 53292-2009 [Электронный ресурс]. Огнезащитные составы и вещества для древесины и материалов на ее основе. Общие требования. Методы испытаний // Сайт Консорциума «Кодекс». <https://kodeks.ru/> (дата обращения: 20.03.2019).
- 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. № 5. P. 168–180. doi: 10.17238/issn0536-1036.2018.5.168.
- Polishchuk E.Yu., Sivenkov A.B., Kenzhehan S.K. Heating and charring of timber constructions with thin-layer fire protection. *Magazine of Civil Engineering*. 2018. Vol. 81, № 5. P. 3–14. doi: 10.18720/MCE.81.1.
- Qu L., Wang Z., Qian J., He Z., Yi S. Effect of combined aluminum-silicon synergistic impregnation and heat treatment on the thermal stability, chemical components, and morphology of wood. *BioResources*. 2019. Vol. 14, № 1. P. 349–362. doi: 10.15376/biores.14.1.349-362.
- Куницкая О.А. Моделирование различных способов пропитки древесины полимерами // *Вестн. Моск. гос. ун-та леса. Лесной вестник*. 2011. № 3. С. 131–135.
- Куницкая О.А., Шапиро В.Я., Бурмистрова С.С., Григорьев И.В., Земцовский А.Е. Обоснование исходных требований математической модели обезвоживания древесины в процессе прессования и сушки // *Изв. вузов -Лесной журнал*. 2012. № 1. С. 70–79.
- Куницкая О.А., Шапиро В.Я., Бурмистрова С.С., Григорьев И.В. Математическая модель процессов прессования и обезвоживания пропитанных древесных материалов // *Научное обозрение*. 2012. № 5. С. 102–114.
- Куницкая О.А., Шапиро В.Я., Бурмистрова С.С., Григорьев И.В. Определение оптимальных параметров процесса прессования и обезвоживания пропитанных древесных материалов // *Вестн. Моск. гос. ун-та леса. Лесной Вестник*. 2012. № 4. С. 110–115.
- Grigorev I.V., Grigorev G.V., Nikiforova A.I., Kunitckaia O.A., Dmitrieva I.N., Khitrov E.G. Zoltán Pásztor Experimental Study of Impregnation Birch and Aspen Samples // *Bioresources*. 2014. № 4. P. 7018–7026.
- Гороховский А.Г., Шишкина Е.Е. Сокращение энергозатрат при конвективной сушке пиломатериалов // *Актуальные проблемы лесного комплекса*. 2007. № 18. С. 89–93.
- Врублевская В.И., Матусевич В.О., Невзорова А.Б. Моделирование гигроскопичности древесины на молекулярном уровне и обоснование качественной СВЧ-сушки // *Вестні Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя фізіка-тэхнічных навук*. 2013. № 1. С. 29–37.
- Платонов А.Д., Курьянова Т.К., Михайлова Ю.С. Влияние продолжительности конвективной сушки на выделение вредных веществ из древесины // *Повышение эффективности процессов и аппаратов в химической и смежных отраслях промышленности: сб. науч. тр. междунар. науч.-технической конф., посвящ. 105-летию со дня рождения А.Н. Плановского*. М., 2016. Т. 2. С. 264–266.
- Платонов А.Д., Михеевская М.А., Снегирева С.Н., Курьянова Т.К., Киселева А.В., Топчеев А.Н. Влияние вариативности сосудов на качество древесины березы и осины в стволе дерева // *Лесотехнический журнал*. 2018. Т. 8, № 2 (30). С. 212–221.
- Гороховский А.Г., Шишкина Е.Е., Старова Е.В., Миков А.А., Булатов С.В. Теоретическое исследование сушильно-весового метода контроля влажности древесины // *Системы Методы Технологии*. 2017. № 3 (35). С. 107–112.
- Кантышев А.В., Борисов А.Ю., Колесников Г.Н. Сушка и пропитка тонкомерных осинового образцов. Инновационные подходы в решении проблем современного общества. Пенза: Наука и Просвещение, 2018. С. 237–244.
- Karlsson O., Sidorova E., Morén T. Influence of heat transferring media on durability of thermally modified wood // *BioResources*. 2011. Vol. 6, № 1. P. 356–372.
- Сафин Р.Р., Хакимянов И.Ф., Кайнов П.А. Методология снижения энергетических затрат и разработка новых принципов в процессах сушки и термовлажностной обработки материалов // *Вестн. Казан. технол. ун-та*. 2015. Т. 18, № 11. С. 128–131.
- Herrera-Díaz R., Sepúlveda-Villaruel V., Pérez-Peña N., Salvo-Sepúlveda L., Salinas-Lira C., Llano-Ponte R., Ananias R.A. Effect of wood drying and heat modification on some physical and mechanical properties of radiata pine // *Drying Technology*. 2018. Vol. 36, № 5. P. 537–544. doi: 10.1080/07373937.2017.1342094.
- Гороховский А.Г., Шишкина Е.Е., Савина В.В. Физическая модель коллоидной капиллярно-пористой структуры древесины // *Хвойные бореальной зоны*. 2018. Т. 36, № 4. С. 350–354.

## References

1. GOST 20022.6-93. Zashchita drevesiny. Sposoby propitki.
2. GOST R 53292-2009. Oгнеzashchitnye sostavy i veshchestva dlya drevesiny i materialov na ee osnove. Obshchie trebovaniya. Metody ispytaniy.
3. 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. № 5. P. 168–180. doi: 10.17238/issn0536-1036.2018.5.168.
4. Polishchuk E.Yu., Sivenkov A.B., Kenzhehan S.K. Heating and charring of timber constructions with thin-layer fire protection. *Magazine of Civil Engineering*. 2018. Vol. 81. № 5. P. 3–14. doi: 10.18720/MCE.81.1.
5. Qu L., Wang Z., Qian J., He Z., Yi S. Effect of combined aluminum-silicon synergistic impregnation and heat treatment on the thermal stability, chemical components, and morphology of wood. *Bio Resources*. 2019. Vol. 14. № 1. P. 349–362. doi: 10.15376/biores.14.1.349-362.
6. Kunickaya O.A. Modelirovanie razlichnyh sposobov propitki drevesiny polimerami // *Vestnik Moskovsko-go gosudarstvennogo universiteta lesa Lesnoj vestnik*, 2011. № 3, S. 131-135.
7. Kunickaya O.A., Shapiro V.YA., Burmistrova S.S., Grigorev I.V., Zemcovskij A.E. Obosnovanie iskhodnyh trebovanij matematicheskoy modeli obezvozhivaniya drevesiny v processe pressovaniya i sushki // *IVUZ "Lesnoj zhurnal"*, 2012. № 1. S. 70-79.
8. Kunickaya O.A., Shapiro V.YA., Burmistrova S.S., Grigorev I.V. Matematicheskaya model' processov pressovaniya i obezvozhivaniya propitannyh drevesnyh materialov // *Nauchnoe obozrenie*, 2012. № 5. S. 102-114.
9. Kunickaya O.A., Shapiro V.Ya., Burmistrova S.S., Grigorev I.V. Opredelenie optimal'nyh parametrov processa pressovaniya i obezvozhivaniya propitannyh drevesnyh materialov // *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo universiteta lesa Lesnoj Vestnik*. 2012. № 4. S. 110-115.
10. Grigorev I.V., Grigorev G.V., Nikiforova A.I., Kunitckiaia O.A., Dmitrieva I.N., Khitrov E.G., Zoltán Pásztory Experimental Study of Impregnation Birch and Aspen Samples // *Biore-sources*, 2014. № 4, P. 7018-7026.
11. Gorohovskij A.G., Shishkina E.E. Sokrashchenie energozatrat pri konvektivnoj sushke pilomaterialov // *Aktual'nye problemy lesnogo kompleksa*. 2007. № 18. S. 89–93.
12. Vrublevskaya V.I., Matusевич V.O., Nevzorova A.B. Modelirovanie gigroskopichnosti drevesiny na molekulyarnom urovne i obosnovanie kachestvennoj SVCH-sushki. *Vesci Natsyonal'naj akademii navuk Belarusi. Seriya fizika-tekhnichnyh navuk*. 2013. № 1. S. 29–37.
13. Platonov A.D., Kur'yanova T.K., Mihajlova Yu.S. Vliyanie prodolzhitel'nosti konvektivnoj sushki na vydelenie vrednyh veshchestv iz drevesiny. *Sbornik nauchnyh trudov Mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii, posvyashchyonnoj 105-letiyu so dnya rozhdeniya A.N. Platonovskogo: Povyshenie effektivnosti processov i apparatov v himicheskoy i smezhnyh otraslyah promyshlennosti*. T. 2. M.: FGBOU VO MGUDT, 2016. S. 264–266.
14. Platonov A.D., Miheevskaya M.A., Snegireva S.N., Kur'yanova T.K., Kiseleva A.V., Topcheev A.N. Vliyanie variativnosti sosudov na kachestvo drevesiny berezy i osiny v stvole dereva. *Lesotekhnicheskij zhurnal*. 2018. T. 8. № 2 (30). S. 212–221.
15. Gorohovskij A.G., Shishkina E.E., Starova E.V., Mikov A.A., Bulatov S.V. Teoreticheskoe issledovanie sushil'novesovogo metoda kontrolya vlazhnosti drevesiny. *Sistemy Metody Tekhnologii*. 2017. № 3 (35). S. 107–112.
16. Kantyshev A.V., Borisov A.Yu., Kolesnikov G.N. Sushka i propitka tonkomernykh osinovykh obrazcov. *Innovacionnye podhody v reshenii problem sovremennogo obshchestva. Pod obshch. red. G.Yu. Gulyaeva*. Penza: Nauka i Prosveshchenie, 2018. S. 237–244.
17. Karlsson O., Sidorova E., Morén T. Influence of heat transferring media on durability of thermally modified wood. *BioResources*. 2011. Vol. 6. № 1. P. 356–372.
18. Safin R.R., Hakimzyanov I.F., Kajnov P.A. Metodologiya snizheniya energeticheskikh zatrat i razrabotka novykh principov v processah sushki i termovlazhnostnoj obrabotki materialov. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta*. 2015. T. 18. № 11. S. 128–131.
19. Herrera-Díaz R., Sepúlveda-Villaruel V., Pérez-Peña N., Salvo-Sepúlveda L., Salinas-Lira C., Llano-Ponte R., Ananías R.A. Effect of wood drying and heat modification on some physical and mechanical properties of radiata pine. *Drying Technology*. 2018. Vol. 36. № 5. P. 537–544. doi: 10.1080/07373937.2017.1342094.
20. Gorohovskij A.G., Shishkina E.E., Savina V.V. Fizicheskaya model' kolloidnoj kapillyarno-poristoj struktury drevesiny. *Hvoynye boreal'noj zony*. 2018. T. 36. № 4. S. 350–354.