

## ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОС В ПРОЦЕССЕ СУШКИ-ПРОПИТКИ ДРЕВЕСИНЫ В ЖИДКИХ СРЕДАХ

Е.А. Белякова, Т.А. Бодылевская

*Проведены исследования вакуумной сушки-пропитки древесины в жидких средах. Разработана математическая модель процесса.*

**Ключевые слова:** *древесина, сушка, жидкость, математическая модель*

*Investigations of vacuum drying-impregnation in liquid media. Developed a mathematical model of the process.*

**Keywords:** *wood, drying, liquid, a mathematical model*

Одним из наиболее ликвидных лесных товаров как у нас в стране, так и за рубежом в настоящее время являются пропитанные деревянные шпалы. Спрос на них стабилен и не подвержен колебаниям. Более того, в будущем прогнозируется дефицит пропитанных шпал. В настоящее время в России действуют 10 шпалопрпиточных заводов, все они входят в структуру МПС и расположены преимущественно в европейской части страны. Производительность каждого из заводов составляет от 100 до 6000 тыс. м<sup>3</sup> в год. При самом скромном техническом оснащении процесса пропитки данные предприятия занимают огромные территории, вследствие использования в технологической цепи естественной атмосферной сушки шпал-заготовок.

Размещение таких крупных предприятий приводит к удорожанию готового продукта и ухудшению экологической ситуации в регионе. Кроме того, возникает ряд сложностей в обеспечении заводов сырьем и материалами. Мировая практика, в частности Финляндии, показала большую эффективность малых заводов, с производительностью от 10 до 30 тыс. м<sup>3</sup> в год. Располагать такие заводы целесообразно в непосредственной близости к производству шпал.

В тоже время известная технология сушки древесины в жидкостях до сих пор остается недостаточно востребованной, вследствие отсутствия должного технического обеспечения и рациональных технологических режимов ведения процесса. Кроме того, в качестве недостатка существующей технологии в литературе отмечается низкое качество сушки, обусловленное значительным перепадом влажности по толщине и действием высоких температур, поскольку основным видом влагопереноса в материале является молярное перемещение пара под действием градиента избыточного давления. По традицион-

ной технологии давление над пиломатериалом складывается из суммы барометрического давления и давления столба гидрофобной жидкости.

В связи с этим на кафедре переработки древесных материалов Казанского государственного технологического университета были проведены исследования вакуумной сушки-пропитки древесины в жидких средах. В данной технологии сушильным агентом является пропитывающий состав, над поверхностью которого в процессе сушки создается разрежение, поэтому удаление влаги из материала происходит под действием молярного переноса, которое возможно при температуре выше точки кипения воды при давлении столба пропитывающей жидкости. Такая схема ведения процесса позволяет снизить температуру среды и тем самым предотвратить изменение физико-механических свойств древесины, вызванных продолжительным действием повышенных температур. Кроме того, мягкие температурные режимы позволяют избежать возникновения значительного градиента температуры, а значит и перепада влажности по сечению древесины.

Для теоретического исследования рассматриваемого способа сушки-пропитки была разработана математическая модель процесса.

Для движущейся жидкой среды дифференциальное уравнение переноса энергии в прямоугольных координатах с учетом стока тепла к материалу и замены субстанциональной производной её выражением согласно [1] принимает вид

$$c_{жс} \rho_{жс} \left( \frac{\partial T}{\partial \tau} + w_x \frac{\partial T}{\partial x} + w_y \frac{\partial T}{\partial y} + w_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) = (1) \\ = \lambda_{жс} \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \gamma_m.$$

Функция стока тепла в этом случае может

быть определена выражением

$$\gamma_m = \alpha \cdot (T_m - T_{m.нов}) \cdot F_m^* \quad (2)$$

где  $F_m^*$  – приведенная площадь материала – характеризует поверхность нагреваемых пиломатериалов, приходящуюся на  $1 \text{ м}^3$  теплоносителя, который находится в сушильной камере.

Так как поток полностью заполняет пространство сушильной камеры, то можно считать, что теплоноситель одновременно обтекает все отдельные элементы штабеля. Тогда, рассматривая одномерную модель обтекания материала и пренебрегая молекулярной теплопроводностью теплоносителя, выражение (1) с учетом уравнения (2) запишем в виде

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} + w_z \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{\lambda_{жс}}{c_{жс} \rho_{жс}} \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{\alpha \cdot (T_m - T_{m.нов}) \cdot F_m^*}{c_{жс} \rho_{жс}} \quad (3)$$

Анализ конструктивных особенностей аппаратов для тепловой обработки различных материалов в жидкостях свидетельствует, что нагревательные элементы располагаются в нижней части камеры, поэтому в уравнении (3) определяющим геометрическим размером  $z$  является расстояние по вертикали от калорифера, а скорость  $w_z$  – является скоростью естественной конвекции.

Изменение температуры жидкой среды вызывает тепло- и массообмен между теплоносителем и поверхностными слоями древесины, что в свою очередь приводит к тепломассопереносу внутри пиломатериала, для описания которого используются дифференциальные уравнения А.В. Лыкова [2]:

$$\frac{\partial U}{\partial \tau} = a_m \left( \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} \right) + a_m \delta \left( \frac{\partial^2 T_m}{\partial x^2} \right) + \frac{k_p}{\rho_0} \left( \frac{\partial^2 p_m}{\partial x^2} \right), \quad (4)$$

$$\frac{\partial T_m}{\partial \tau} = \frac{a_m r \varepsilon}{c} \left( \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} \right) + \left( a_m + \frac{a_m r \varepsilon \delta}{c} \right) \left( \frac{\partial^2 T_m}{\partial x^2} \right) + \frac{a_m r \varepsilon \delta_p}{c} \left( \frac{\partial^2 p_m}{\partial x^2} \right), \quad (5)$$

$$\frac{\partial p_m}{\partial \tau} = \left( a_p - \frac{a_m \varepsilon \delta_p}{c_p} \right) \left( \frac{\partial^2 p_m}{\partial x^2} \right) - \frac{a_m \varepsilon}{c_p} \left( \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} \right) - \frac{a_m \varepsilon \delta}{c_p} \left( \frac{\partial^2 T_m}{\partial x^2} \right). \quad (6)$$

Расчет системы дифференциальных уравнений (3) – (6) производится с помощью следующих краевых условий

начальные условия

$$T_{жс}(0; x) = T_{жс.0},$$

$$U(0; x) = U_0,$$

$$T_m(0; x) = T_{m.0},$$

$$p_m(0; x) = P_{атм}.$$

граничные условия

$$T(\tau, 0) = T_{нов.кал},$$

$$j_{нов} - \beta \cdot (\rho_{рав} - \rho) = 0,$$

$$\alpha \cdot (T - T_{m.нов}) - j_{нов} \cdot r = -\lambda \frac{\partial T_m}{\partial x} \Big|_{x=0},$$

$$p_{m.нов} = P_{жс}.$$

Поток влаги к поверхности массообмена можно определить из соотношения [2]

$$j_{нов} = \rho_0 \left( a_m \frac{\partial U}{\partial x} \Big|_{x=0} + a_m \delta \frac{\partial T_m}{\partial x} \Big|_{x=0} + \frac{k_p}{\rho_{cp}} \frac{\partial p_m}{\partial x} \Big|_{x=0} \right).$$

В процессе сушки древесины по мере удаления влаги плотность её потока изнутри материала к поверхности постепенно падает, что в результате приводит к выравниванию взаимобратных потоков естественной влаги и окружающей материал жидкости, стремящейся проникнуть в капилляры древесины (в том случае если жидкость смачивает пиломатериал). В этот момент начинается пропитка древесины, которую можно рассматривать как движение смачивающей жидкости в капилляре с заземленным газом. При этом основное влияние на продвижение жидкости в капилляре оказывают процессы растворения и диффузии находящихся в капилляре водяных паров в пропитывающую жидкость.

Скорость движения жидкости в тупиковом капилляре, скорость растворения и диффузии заземленного в нем газа описывается уравнением [3]

$$\frac{dx}{d\tau} = \frac{\alpha^* \cdot k \cdot R \cdot T_m \sqrt{D}}{\sqrt{\pi}} \cdot \frac{1}{\sqrt{\tau}},$$

где

$$\alpha^* = \frac{2\sigma_{жс} \cdot \cos \theta}{r_{кан} \cdot P + 2\sigma_{жс} \cdot \cos \theta}.$$

Для определения меры смачивания пористого тела получена зависимость [4]

$$\cos \theta = 1 - \varphi_m \sqrt{\frac{1}{3(1 - C_{нов}) \left( \frac{1}{h^2} \sqrt{\frac{2\sigma_{жс}}{\rho_{жс} g}} - \frac{1}{2} \right)}}.$$

На основании экспериментальных исследований для поверхностной пористости древесины

установлена зависимость [4]

$$C_{нов} = 146(1 - 0,649\rho_{с.м}) - \frac{100}{\rho_{д.в}}$$

Плотность потока пропитывающей жидкости определим из выражения

$$j_{ж} = \rho_{ж} \cdot \frac{dx}{d\tau}$$

Представленная математическая модель позволяет полностью описать процессы, протекающие при вакуумной сушке-пропитке древе-

сины в гидрофобных жидкостях.

Для проверки предложенной математической модели на адекватность была создана экспериментальная установка, представленная на рис. 1 и 2, которая состоит из вакуумной камеры 1 с крышкой 2, с внутренней стороны которой смонтирован электронный датчик веса 3. Сигнал от датчика 3 преобразуется АЦП 4 и поступает в ЭВМ 5 для записи и дальнейшей обработки.

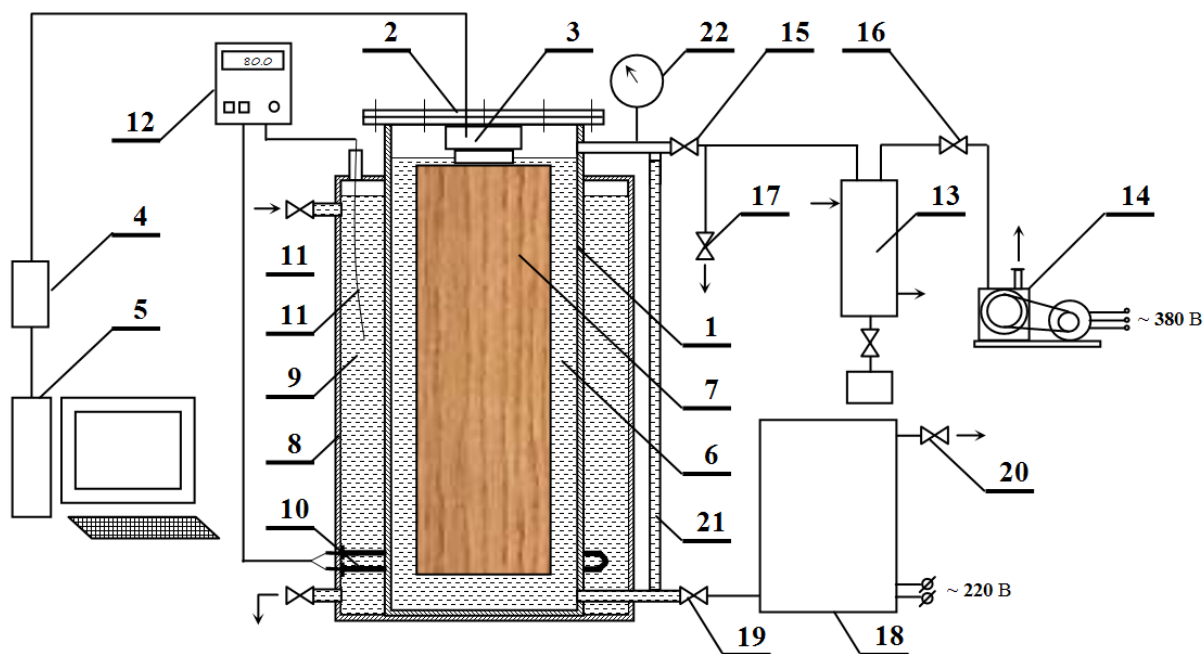


Рис. 1. Установка для исследования кинетики совмещенной вакуумной сушки-пропитки пиломатериала



Рис. 2 Фото установки

Вакуумная камера 1 заполнена гидрофобной жидкостью 6, с погруженной в неё исследуемым образцом 7. Камера 1 снабжена рубашкой 8, теплоносителем 9 которой получает тепловую энергию от трубчатого электронагревателя 10. Температура теплоносителя 9 контролируется с помощью погруженной в него термопары 11 и электронного регулятора ТРМ ОВЕН1 (поз. 12). Внутренняя полость камеры 1 сообщается с линией вакуумирования, состоящей из конденсатора 13 со стеклянным мерным сборником конденсата и вакуум-насоса 14, – через вентили 15 и 16, а также с атмосферой – через вентиль 17 и с емкостью 18 для хранения гидрофобной жидкости 6 – через вентиль 19. Емкость 18 снабжена электрической системой обогрева для предварительного прогрева гидрофобной жидкости, а внутренняя полость емкости сообщается с атмосферой через вентиль 20. Для определения уровня гидрофобной жидкости в камере 1 используется

мерная трубка 21. Давление разряжения в полости аппарата контролируется с помощью манометра 22.

Методика проведения исследований на представленной установке состоит из трех этапов: подготовки исследуемых образцов, проведения экспериментов и компьютерной обработки полученных результатов.

Подготовка исследуемых образцов предполагает выбор крупномерного сортамента и определение его начальной массы, объема и влажности. В экспериментах по изучению совмещенной сушки-пропитки древесины используются образцы длиной 1 м, выпиливаемые из промышленных шпал-заготовок или оцилиндрованных бревен. Из оставшейся части заготовки выпиливаются два среза: один для определения среднего влагосодержания, второй – для дальнейшего определения позонной влажности. По среднему влагосодержанию древесины определяется теоретическое значение массы всей влаги, содержащейся в исследуемом образце. Для определения начальной массы образец взвешивается на электронных весах с точностью 1 г. Объем исследуемого образца определяется с помощью замеров штангенциркулем и служит для нахождения объема вытесненной жидкости.

Подготовленный таким образом к проведению экспериментальных исследований образец помещается в вакуумную камеру 1, после герметизации которой с помощью крышки 2 в работу включается вакуумный насос 14. При открытых вентилях 15, 16, 19 и 20 и закрытом 17 начинается создание вакуума в аппарате и заполнение его предварительно нагретой гидрофобной жидкостью из емкости 18. После подъема уровня жидкости до определенного значения, контролируемого с помощью мерной трубки 21, подача агента сушки в камеру 1 прекращается, для чего перекрывается вентиль 19. Давление в камере 1 понижается до создания максимально возможного разряжения, определяемого техническими характеристиками вакуумного насоса 14, после чего перекрывается вентиль 16 и производится выключение вакуум-насоса 14. Поскольку в аппарате отсутствуют неконденсирующиеся газы, дальнейшее поддержание давления в камере 1 на заданном значении осуществляется с помощью конденсатора 13.

Погруженный в гидрофобную жидкость исследуемый образец под действием силы Архимеда оказывает давление на смонтированный на крышке электронный датчик 3. В процессе сушки влажной древесины её плотность снижается, в

результате чего возрастает подъемная сила, действующая на шпалу. Регистрируя изменение результирующей силы, возможно определение изменения средней плотности исследуемого образца в процессе проведения эксперимента. Средняя плотность образца может быть определена по формуле

$$\bar{\rho}_m = \frac{F_{рез} - g \cdot V \cdot \rho_{жс}}{g \cdot V}.$$

В процессе проведения эксперимента фиксируется изменение уровня гидрофобной жидкости в камере 1 с помощью мерной трубки 21. Изменение объема гидрофобной жидкости в аппарате за вычетом объема данной жидкости, удаленной системой вакуумирования и собранной в мерном сборнике конденсатора 13, характеризует количество жидкости, ушедшей на пропитку древесины.

Продолжительность процесса сушки в предложенном аппарате лимитируется массой образовавшегося конденсата приблизительно равной теоретическому значению массы влаги в образце перед началом эксперимента. После окончания сушки в зависимости от плана эксперимент заканчивается или начинается процесс пропитки путем отключения нагревательных элементов 10 и охлаждения всей конструкции. Для этого из рубашки 8 сливается теплоноситель 9 и подается хладагент. Открытием вентиля 17 над поверхностью гидрофобной жидкости создается атмосферное давление. При охлаждении древесины давление в полостях клеток снижается отчасти за счет собственно температурного эффекта, а главным образом за счет конденсации водяного пара. В результате образовавшегося перепада давлений жидкость проникает в древесину. Продолжительность данной стадии эксперимента определяется снижением скорости роста плотности образца.

После окончания эксперимента образец подвергается детальному исследованию, при котором определяются конечные влажность, масса и объем, а также плотность образца в его непропитанной части с целью точного определения массы жидкости, пропитавшей древесину.

Результаты проведенных исследований представлены в виде графических зависимостей на рис. 3, где сплошными линиями изображены данные, полученные расчетным путем, точками – результаты экспериментов.

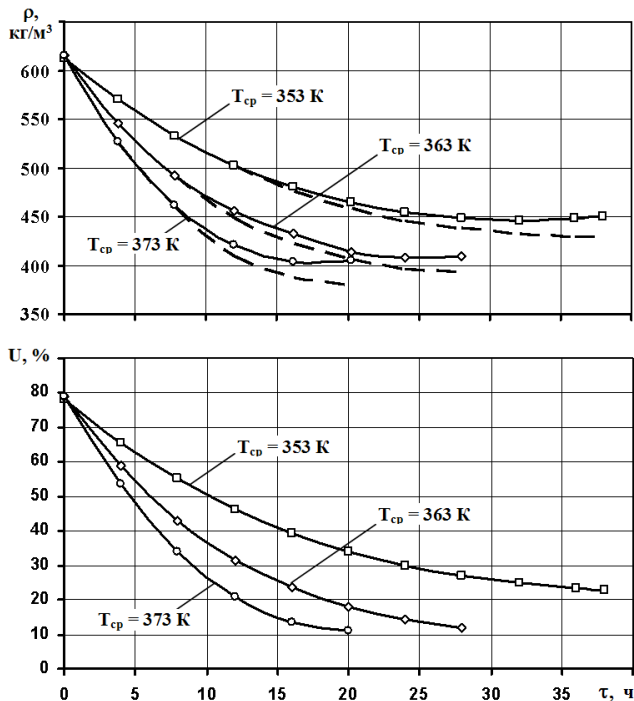


Рис. 3. Кинетические кривые изменения плотности и средней влажности сосновой доски в процессе сушки в жидкостях

Анализ полученных зависимостей свидетельствует, что при удалении свободной влаги из древесины пропитка последней агентом обработки не происходит (плотность образца постоянно снижается). Это объясняется наличием внутреннего избыточного давления, возникающего вследствие вскипания свободной влаги в материале и препятствующего проникновению пропитывающего состава. При удалении связанной влаги, когда интенсивного молярного переноса не наблюдается, начинается пропитка древесины: кривая плотности образца начинает расти, после

чего наблюдается стабилизация значения плотности. Снижение температуры среды в этом периоде при одновременном повышении давления в аппарате до атмосферного приводит к интенсификации процесса пропитки, вследствие конденсации водяных паров в поверхностных зонах древесины и созданию разрежения в полостях клеток.

Проверкой на адекватность установлено, что максимальное расхождение между расчетными и экспериментальными данными не превышает 18 %. При этом сопоставление результатов математического моделирования и экспериментальных исследований показало, что принятие критерия фазового перехода в уравнениях тепло-массопереноса внутри материала  $\varepsilon = 0,9$  вводит наименьшую ошибку в расчеты.

#### Список литературы

1. Протодьяконов И.О., Марцулевич Н.А. Явления переноса в процессах химической технологии: учеб. пособие. М.: Химия, 1981. 264 с.
2. Лыков М.В. Теория сушки: учеб. пособие. М.: Наука, 1968. 472 с.
3. Дерягин Б.В. О диффузионном извлечении из пористых материалов в процессе капиллярной пропитки / Б.В. Дерягин, М.А. Альтшуллер // Коллоидный журнал. 1946. Т.8. № 1 – 2.
4. Пятякин В.И., Тишин Ю.Г., Базаров С.М. Техническая гидродинамика древесины: учеб. пособие. М.: Лесн. пром-сть, 1990. 304 с.
5. Коган В.Б. Гетерогенные равновесия: учеб. пособие. М.: Химия, 1968. 432 с.