

 МЕХАНИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ДРЕВЕСИНЫ
И ДРЕВЕСИНОВЕДЕНИЕ

УДК 539.12.08+699.887.5(022)

DOI: 10.37482/0536-1036-2022-2-159-169

**ТЕХНОЛОГИЯ МОДИФИКАЦИИ ДРЕВЕСИНЫ БЕРЕЗЫ
ДЛЯ СОЗДАНИЯ НЕЙТРОНОЗАЩИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ***А.Р. Бирман¹, д-р техн. наук, проф.; ResearcherID: [X-3713-2019](https://orcid.org/0000-0002-1693-0515),**ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1693-0515>**А.А. Тамби², д-р техн. наук, проф.; ResearcherID: [J-9614-2017](https://orcid.org/0000-0003-4099-3409),**ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4099-3409>**С.А. Узрюмов¹, д-р техн. наук, проф.; ResearcherID: [F-6510-2016](https://orcid.org/0000-0002-8077-3542),**ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8077-3542>**П.Р. Гильванов³, канд. техн. наук, доц.; ResearcherID: [AAZ-9283-2021](https://orcid.org/0000-0003-0051-8857),**ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0051-8857>*

¹ Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет им. С.М. Кирова, Институтский пер., д. 5, литер У, Санкт-Петербург, Россия, 194021; e-mail: birman1947@mail.ru, ugr-s@yandex.ru

² Арктический государственный агротехнологический университет, ш. Сергеляхское, 3-й км, д. 3, г. Якутск, Россия, 677007; e-mail: a_tambi@mail.ru

³ Военно-космическая академия им. А.Ф. Можайского, ул. Ждановская, д. 13, Санкт-Петербург, Россия, 197198; e-mail: vka_kaf104@mail.ru

Оригинальная статья / Поступила в редакцию 07.04.21 / Принята к печати 02.08.21

Аннотация. Рассмотрен способ получения нейтронозащитных материалов на основе модифицированной древесины березы. Для создания защиты от нейтронного излучения в атомной промышленности, медицине и военно-промышленном комплексе широко используются материалы на основе полиэтилена с добавлением бора. За счет высокого содержания водорода их применение позволяет защитить объекты от воздействия быстрых нейтронов, а тепловые нейтроны эффективно сдерживаются благодаря наличию в защитных экранах атомов бора. Древесина также является водородосодержащим материалом, поэтому представляет научный и практический интерес создание и исследование свойств нейтронозащитных материалов на ее основе. Наиболее целесообразно создание нейтронозащитных материалов из древесины лиственных пород, характеризующихся высокой удельной плотностью и, соответственно, большим содержанием водорода в единице объема. Увеличить содержание водорода в единице объема древесины, и, следовательно, снизить толщину защитного слоя можно уплотнением древесины способом плоского (одноосного) прессования. Основное условие получения высокопрочной и формоустойчивой прессованной древесины – сохранение ее микроструктуры (без повреждений) во время прессования. Теоретическим путем установлено, что оптимальная степень прессования, при которой наблюдается наименьший процент микроразрушений в древесине, составляет 50 %. В экспериментальной части работы для изготовления опытного нейтронозащитного материала использовали березовые пиломатериалы радиального распила длиной 200 мм, шириной 100 мм и толщиной 80 мм. Получены нейтронозащитные материалы толщиной 40 мм, эквивалентные по содержанию водорода в единице объема защите из полиэтилена толщиной 26,8 мм.

Данная статья опубликована в режиме открытого доступа и распространяется на условиях лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (CC BY 4.0) • Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Как известно, в процессе плоского прессования в древесине возникают распирающие усилия, которые могут приводить к появлению трещин, разрушению кромок, выпучиванию, расслаиванию, снижению равномерности распределения плотности. Распирающие усилия действуют в направлении, перпендикулярном действию приложенной нагрузки. Поэтому при изготовлении нейтронозащитного композиционного материала необходимо использовать пресс-формы с боковыми упорами, купирующие воздействие распирающего усилия. Конструктивные параметры пресс-форм и режимы прессования определены с учетом сопротивления, обусловленного силами трения древесины о боковые стенки пресс-формы. Представлена конструкция пресс-формы, обеспечивающая получение из древесины нейтронозащитного материала с заданными свойствами.

Для цитирования: Бирман А.Р., Тамби А.А., Угрюмов С.А., Гильванов П.Р. Технология модификации древесины березы для создания нейтронозащитных материалов // Изв. вузов. Лесн. журн. 2022. № 2. С. 159–169. DOI: 10.37482/0536-1036-2022-2-159-169

Ключевые слова: нейтронозащитный композиционный материал, модификация древесины, прессование, нагружение, пресс-форма.

BIRCH WOOD MODIFICATION TECHNOLOGY FOR CREATING NEUTRON SHIELDING MATERIALS

*Alexei R. Birman*¹, Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [X-3713-2019](https://orcid.org/0000-0002-1693-0515), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1693-0515>

*Alexander A. Tambi*², Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [J-9614-2017](https://orcid.org/0000-0003-4099-3409), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4099-3409>

*Sergey A. Ugryumov*³, Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [F-6510-2016](https://orcid.org/0000-0002-8077-3542), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8077-3542>

*Pavel R. Gilvanov*³, Candidate of Engineering, Assoc. Prof.; ResearcherID: [AAZ-9283-2021](https://orcid.org/0000-0003-0051-8857), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0051-8857>

¹Saint-Petersburg State Forest Technical University named after S.M. Kirov, Institutskiy per., 5, liter U, Saint Petersburg, 194021, Russian Federation; e-mail: birman1947@mail.ru, ugr-s@yandex.ru

²Arctic State Agrotechnological University, sh. Sergelyakhskoye, 3-y km, 3, Yakutsk, 677007, Russian Federation; e-mail: a_tambi@mail.ru

³Military Space Academy named after A.F. Mozhaisky, ul. Zhdanovskaya, 13, Saint Petersburg, 197198, Russian Federation; e-mail: vka_kaf104@mail.ru

Original article / Received on April 7, 2021 / Accepted on August 2, 2021

Abstract. The article considers a method for producing neutron shielding materials based on modified birch wood. It is known that shielding materials based on polyethylene with boron addition are widely used in the nuclear industry, medicine and the military-industrial complex to create protection against neutron radiation. Due to the high hydrogen content, their use makes it possible to protect objects from the effects of fast neutrons, and thermal neutrons are effectively contained due to the presence of boron atoms in the protective screens. Wood is also a hydrogen-containing material, therefore, it is of scientific and practical interest to create and study the properties of neutron shielding materials based on wood. The most expedient is the creation of neutron shielding materials from hardwood, which have a high specific density and, accordingly, a high content of hydrogen per unit volume. It is possible to increase the hydrogen content per unit volume of wood and, accordingly, to reduce the thickness of the protective layer due to the compaction of wood by the method of flat (single-axis) pressing. The main condition for obtaining high-strength and form-resistant pressed

This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) license • The authors declare that there is no conflict of interest

wood is the preservation of its microstructure (without damage) during pressing. It has been theoretically found that the optimal pressing stage, at which the lowest percentage of microfractures in wood is observed, should not exceed 50 %. In the experimental part of the work, birch lumber was used for the production of an experimental neutron shielding material, radial sawn with a length of 200 mm, a width of 100 mm, and a thickness of 80 mm to obtain ready-made neutron shielding materials with a thickness of 40 mm, which is equivalent to a polyethylene shielding thickness of 26.8 mm. It is known that during flat pressing bursting forces occur in wood, which can lead to cracks, destruction of edges, buckling, delamination, and a decrease in the uniformity of the density distribution. The bursting force acts in the direction perpendicular to the action of the applied load. Therefore, in the manufacture of a neutron shielding composite material, it is necessary to use press molds (with side stops) that stop the impact of the bursting force. The design parameters of the press molds and pressing modes are determined taking into account the resistance caused by the friction forces of the wood against the side walls of the press mold. The design of a press mold that provides the production of a neutron shielding material of specified properties from wood is presented.

For citation: Birman A.R., Tambi A.A., Ugryumov S.A., Gilvanov P.R. Birch Wood Modification Technology for Creating Neutron Shielding Materials. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2022, no. 2, pp. 159–169. DOI: 10.37482/0536-1036-2022-2-159-169

Keywords: neutron shielding composite material, wood modification, pressing, loading, press mold.

Введение

Запрет вывоза круглых лесоматериалов из Российской Федерации и введение таможенных пошлин на экспорт пиломатериалов являются предпосылками для создания новых деревообрабатывающих производств внутри страны.

При этом Стратегия развития лесного комплекса до 2030 г. требует увеличения объемов заготовки древесины, что неминуемо приведет к вовлечению в переработку низкотоварной древесины с большой кривизной и эллиптичностью. Размерные характеристики такого сырья не позволят эффективно использовать его в производстве наиболее распространенных продуктов лесопромышленного комплекса – пиломатериалов и фанеры.

Тем не менее круглые лесоматериалы с пороками формы могут успешно применяться для создания востребованной высокомаржинальной продукции в виде нейтронозащитных материалов для атомной промышленности, предприятий военно-промышленного комплекса и медицинской сферы, что позволит не только сформировать новый рынок продукции для лесопромышленного комплекса, но и обеспечить здесь импортозамещение.

Для защиты от нейтронного излучения в названных сферах используются материалы торговой марки Neutrostop из полиэтилена, а также полиэтилена с добавлением бора в объеме 3,5–5 %, выпускаемые в Чехии. За счет высокого содержания водорода их применение позволяет защитить объекты от воздействия быстрых нейтронов, а наличие в защитных экранах атомов бора [5, 25] эффективно сдерживает тепловые нейтроны.

Анализ химического состава полиэтилена $(C_2H_4)_n$ показывает, что массовая доля содержания в нем C = 86 %, а H = 14 %. Средняя плотность полиэтилена низкого давления – 950 кг/м³, т. е. в 1 м³ содержится 133 кг водорода.

Древесина также является водородосодержащим материалом. Доля химических элементов во всех древесных породах практически одинакова: С = 48,6 %, О = 45 %, Н = 6,4 % [7].

В березовой древесине, плотность которой в абсолютно сухом состоянии – 620 кг/м³, в 1 м³ – 39,7 кг водорода. У древесины влажностью 12 % содержание водорода больше – до 44,6 кг.

Таким образом, при замене полиэтилена древесиной толщина ее слоя, обладающего равными с полиэтиленом защитными свойствами, при учете экранирующей способности только по содержанию водорода должна быть больше в 2,98 раза, чем при использовании полиэтилена. При этом масса защиты увеличится всего в 2,01 раза. Одним из основных критериев оценки защитного слоя становится толщина, снижение которой – актуальная задача.

Цель исследования – разработка способа модификации древесины березы для создания из нее нейтронозащитного материала.

Объекты и методы исследования

Для создания нейтронозащитных материалов из древесины наиболее целесообразно использовать лиственные породы: они обладают высокой удельной плотностью и, соответственно, большим содержанием водорода в единице объема. Увеличить содержание водорода в единице объема древесины и, следовательно, снизить толщину защитного слоя возможно за счет уплотнения [1, 2, 9, 20, 22, 26].

Для проведения исследований выбрана древесина березы, что обусловлено ее высокой плотностью и широким распространением, обеспечивающим ее эксплуатационную доступность. Древесина березы, обладая хорошими механическими свойствами, занимает первое место по промышленному применению среди лиственных пород Российской Федерации [12].

Древесина березы по плотности (см. таблицу) незначительно уступает древесине бука и дуба, но стоит значительно меньше, а получаемые из этой породы сортименты, малого диаметра и имеющие кривизну, не находят промышленного применения. Вовлечение их в промышленную переработку позволит повысить экономическую эффективность лесозаготовительных предприятий [11].

Плотность пород древесины в зависимости от ее влажности, кг/м³

Порода	Влажность 12 %	Абсолютно сухая древесина
Осина	495	465
Береза	640	620
Бук	680	650
Дуб	690	655

Береза обладает меньшей на 10 % прочностью при сжатии по сравнению с дубом, но почти одинаковой с ним прочностью при статическом изгибе и более высокой (на 10 %) удельной работой при ударном изгибе [12, 19].

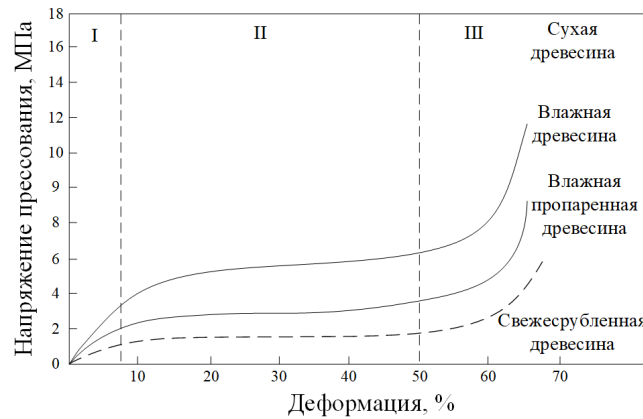
Для уплотнения древесины целесообразно использовать способ плоского (одноосного) прессования заготовок. Усилие прессования в этом случае определяется по формуле

$$P = bl\sigma_x,$$

где P – необходимое усилие прессования; b и l – соответственно ширина и длина образца; σ_x – сопротивление древесины прессованию [18, 21, 23].

Процессы, протекающие в древесине при сжатии поперек волокон, представлены на диаграмме (рис. 1) [2, 8, 16, 24, 29]. Как видно из нее, деформация древесины при сжатии поперек волокон протекает в три фазы. Первая фаза занимает на диаграмме σ – ε (σ – напряжение прессования, МПа, ε – деформация, %) участок от $\varepsilon = 0\%$ до $\varepsilon = 3\text{--}6\%$, что определяется как влажностью, так и температурой древесины. В первой фазе деформация протекает практически линейно. Во второй – значительно медленнее и располагается в диапазоне от $\varepsilon = 3\text{--}6\%$ до $\varepsilon = 45\text{--}55\%$.

Рис. 1. Зависимость деформации от напряжения при прессовании древесины. I–III – фазы деформации
Fig. 1. Dependence of deformation on stress during wood pressing. I – III – phases of deformation



Предельная величина деформации во второй фазе определяется плотностью и влажностным состоянием древесины: чем выше плотность и ниже влажность исходной древесины, тем меньше конечная величина деформации в этой фазе и тем большее напряжение деформации необходимо создавать для достижения заданного уровня деформации. Третья фаза деформации описывается плавной кривой с очень крутым подъемом. Между второй и третьей фазами наблюдается медленный переход. Во всех трех фазах происходит смятие анатомических элементов древесины. Зависимость между деформацией и напряжением может быть выражена уравнением

$$\varepsilon = \sigma/E + (1/2\eta)(\sigma^2/\nu),$$

где E – модуль упругости древесины при сжатии поперек волокон; η – коэффициент вязкости материала; ν – скорость нагружения (const).

Деформация оболочек клеток древесины подчиняется данному уравнению только до определенного значения напряжения. За пределами этого значения закон деформации оболочек резко изменяется. Предельным значением становится критическое напряжение $\sigma_{кр}$, с наступлением которого оболочки клеток значительно деформируются и сминаются, а дальнейшая деформация протекает почти при неизменном давлении. Момент начала смятия оболочек клеток является концом первой и началом второй фазы деформации сжатия древесины поперек волокон.

Главное условие получения высокопрочной прессованной древесины – сохранение ее микроструктуры (без разрушения) во время прессования. Исходя из анализа рис. 1 и литературных источников оптимальная степень прессования, при которой наблюдается появление микроразрушений в древесине [8, 13, 15], в том числе под воздействием температуры, – 50 %, что является граничным значением.

Таким образом, для сохранения структуры уплотненной древесины рационально осуществлять упрессовку до наступления третьей фазы. Это позволит избежать образования в древесине значительных напряжений, вызываемых деформацией поздней древесины, которые могут привести к ее распрессовке после стабилизации в эксплуатационных условиях. Достижимая при этом степень уплотнения уменьшает объем древесины в 2 раза, а толщина нейтронозащитного материала из нее будет всего в 1,49 раза больше, чем из полиэтилена, при равном содержании водорода в единице объема.

Для изготовления опытного нейтронозащитного материала использовали березовые пиломатериалы, имеющие радиальный наклон волокон, изготовленные в соответствии с ГОСТ 2695–83. Исходные размеры образцов: толщина – 80 мм; ширина (b), измеренная поперек волокон древесины, – 100 мм; длина (l), измеренная вдоль волокон древесины, – 200 мм.

Исходные размеры образца позволяют получать готовые нейтронозащитные материалы толщиной 40 мм, что эквивалентно по содержанию водорода в единице объема толщине защиты из полиэтилена, равной 26,8 мм.

Результаты исследования и их обсуждение

Контактной поверхностью образца является площадь $b \times l$.

Подготовка пиломатериалов к уплотнению включает их предварительную сушку в конвективных сушильных камерах до влажности 30 % в режиме 9-Б [3].

Для обеспечения деформирования и уплотнения древесины в соответствии с данными о предельной степени деформации (50 %) был принят режим прессования [14], учитывающий необходимость воздействия на древесину температурой для повышения ее деформативности за счет снижения модуля упругости. Последующее охлаждение деформированной древесины в зажатом состоянии осуществляется для стабилизации размеров и формы готовых изделий.

При плоском прессовании в древесине возникают распирающие усилия, которые могут приводить к появлению в обрабатываемом материале трещин, разрушению кромок, выпучиванию и расслаиванию образцов, снижению равномерности распределения плотности в их объеме и т. д. [4, 27]. В процессе уплотнения древесины распирающие усилия действуют в направлении, перпендикулярном действию приложенной нагрузки. Отношение бокового давления к давлению прессования учитывается коэффициентом бокового давления. Зависимость бокового давления от давления прессования для изделий с различной формой сечения имеет линейный характер.

При изготовлении нейтронозащитного композиционного материала необходимо использовать пресс-формы, купирующие воздействие распирающего усилия. Это принципиально важно, поскольку основной задачей является

формирование материала со свойствами, минимально различающимися в зависимости от объема, а полученные изделия должны иметь высокую точность формы. Следовательно, в случае использования наименее энергоемкого и самого простого в реализации метода плоского прессования для сохранения формы древесины при нарастании деформации нужно применять пресс-формы с боковыми упорами. Их наличие обеспечит протекание деформации в заданном направлении без расширений образца, что может случаться, если древесина прессуется в открытом прессе [28].

Расчитывая конструктивные параметры пресс-форм и режимов прессования, необходимо учитывать сопротивление, обусловленное силами трения древесины о боковые стенки пресс-формы, которое определяется по формуле

$$P_{\text{доп}} = P_1(1 + f),$$

где P_1 – распирающее усилие; f – коэффициент трения древесины о стенки пресс-формы.

Вертикальные стенки пресс-формы имеют дополнительную функцию: при изготовлении их высотой, равной высоте готового изделия, они работают и в качестве вертикальных упоров, ограничивающих перемещение плиты пресса. Простота конструкции такой пресс-формы обеспечивает ее невысокую стоимость.

Для проведения экспериментальных запрессовок была изготовлена пресс-форма, позволяющая одновременно обрабатывать от 1 до 18 образцов. Выбор многопозиционной пресс-формы объясняется тем, что ее опорная площадь достаточно велика и при прессовании отпадает необходимость установки между плитами дополнительных опор, предотвращающих деформацию верхней плиты.

Требуемое расчетное усилие при запрессовке одного образца

$$F = PS_1 = 15 \cdot 10^6 \cdot 0,02 = 30,6 \text{ т.с.},$$

где P с учетом преодоления сил трения $P_{\text{доп}}$ находится в диапазоне 14,3–15,2 МПа, при расчетах пресс-формы P принималось равным 15 МПа; S_1 – контактная площадь образца, $S_1 = 0,02 \text{ м}^2$.

Расчетная площадь пресс-формы в плане – 0,49 м²; масса – около 60 кг.

Сборочный чертеж пресс-формы представлен на рис. 2.

Пресс-форма представляет собой сварную конструкцию из стандартных швеллеров № 12 с параллельными полками. Крайние полки швеллеров, воспринимающие нормальные распирающие усилия спрессованной древесины, дополнительно укреплены уголками 50×50×4 мм и 12 ребрами жесткости, в 4 из которых имеются отверстия для пропуска грузозахватных элементов, при необходимости используемых во время перемещения пресс-формы.

Просвет между внутренними поверхностями швеллеров составляет 104,4 мм, что позволяет свободно располагать заготовки стандартной ширины, 100 мм, в ручьях пресс-формы.

Заготовки высотой 80 мм, размещенные в пресс-форме, нагревают в прессе до температуры, предусмотренной технологическим режимом [2, 6, 10, 17], и подвергают прессованию. При достижении деформации 50 % верхняя плита пресса ложится на полки швеллеров пресс-формы. Размер спрессованных образцов по высоте в этот период достигает заданной величины, 40 мм.

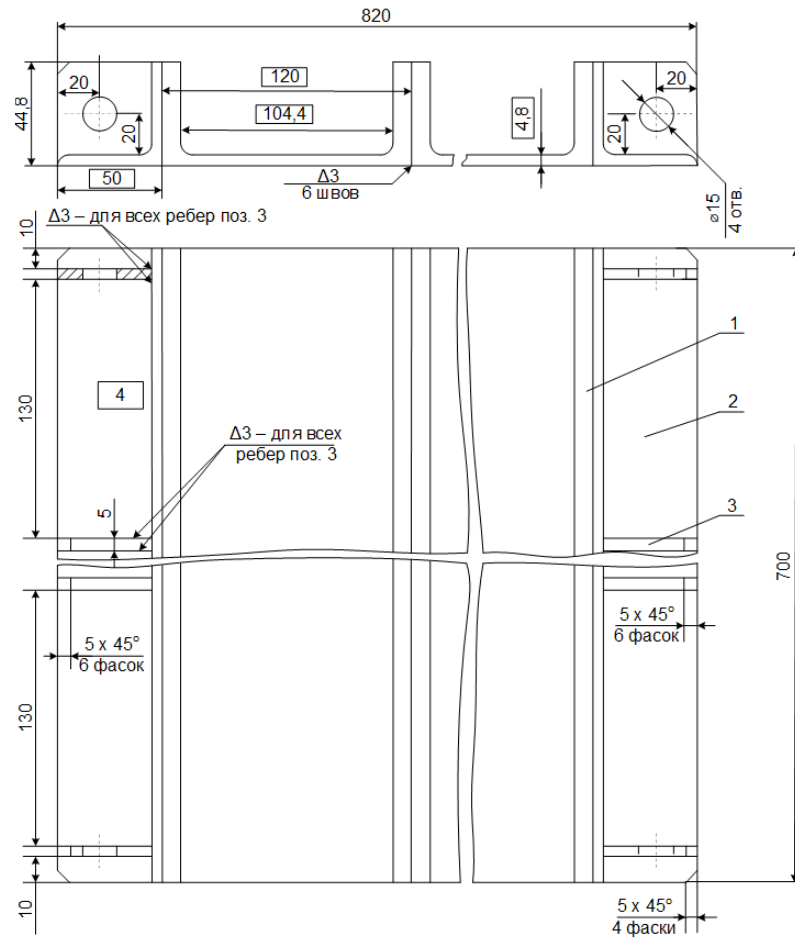


Рис. 2. Пресс-форма одноосного прессования: 1 – ребро, количество – 12 шт., расположены на расстоянии 130 мм друг от друга; 2 – уголок равнополочный, 2 шт., 50×50×4, ГОСТ 8509–93, из Ст. 3 по ГОСТ 535–2005; 3 – швеллер № 12П, ГОСТ 8240–89, из Ст. 3 по ГОСТ 535–2005. Рамкой обозначены справочные размеры

Fig. 2. Single-axis press mold: 1 – an edge located at a distance of 130 mm from each other, 12 pcs.; 2 – an equal flange angle block, 50×50×4, State Standard GOST 8509–93, Steel Ст. 3 according to the State Standard GOST 535–2005, 2 pcs.; 3 – channel no. 12P, State Standard GOST 8240–89, Steel Ст. 3 according to the State Standard GOST 535–2005; the dimensions in the frame are for reference

По завершении термопьезообработки пресс-форму извлекают из пресса, выгружают готовую продукцию, и процесс прессования повторяется.

Для работы в производственных условиях рекомендуется подавать пресс-форму в пресс с загрузочной этажерки, а выгрузку образцов осуществлять толкателем, направленным вдоль швеллеров.

Выводы

1. Древесина может использоваться в качестве нейтронозащитного материала.

2. Для создания нейтронозащитных материалов из древесины рекомендуется ее уплотнение способом плоского (одноосного) прессования.

3. Рациональным является уплотнение древесины в 2 раза по сравнению с ее исходным состоянием, что обеспечивает минимальную толщину защитных материалов при сохранении целостности ее внутренней структуры.

4. Модифицированная уплотнением древесина березы может эффективно заменить материалы из полиэтилена при создании защиты от нейтронного излучения в медицинских организациях, на предприятиях военно-промышленного комплекса и в других сферах.

5. Оценка защитных свойств древесины произведена с учетом наличия в ней влаги в виде воды (H_2O). Однако связанная влага в древесине содержит и другие, кроме Н и О, элементы, которые дополнительно повышают ее нейтронозащитные свойства. Учет влияния дополнительных элементов, присутствующих в связанной влаге древесины, на ее нейтронозащитные свойства является темой дальнейших исследований.

6. Разработанная технология модификации древесины березы и пресс-форма для ее прессования могут быть полезны отраслевым предприятиям и внедрены в производство в ближайшее время.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Бирман А.Р., Белоногова Н.А. Нейтронозащитные свойства древесины // Изв. вузов. Лесн. журн. 2008. № 1. С. 101–106. Birman A.R., Belonogova N.A. Neutron-Shielding Wood Characteristics. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2008, no. 1, pp. 101–106. URL: <http://lesnoizhurnal.ru/upload/iblock/279/279bc2fa19ff8f346e3988f2ad6c7849.pdf>

2. Бирман А.Р., Белоногова Н.А., Соколова В.А. Нейтронозащитные материалы из древесины // Изв. СПбЛТА. 2015. Вып. 212. С. 176–184. Birman A.R., Belonogova N.A., Sokolova V.A. Neutron Protective Wood Materials. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotekhnicheskoy Akademii* [News of the Saint Petersburg State Forest Technical Academy], 2015, iss. 212, pp. 176–184.

3. Болдырев П.В. Сушка древесины. Практическое руководство. СПб.: ПРОФИКС, 2002. 156 с. Boldyrev P.V. *Drying of Wood. Practical Guide*. Saint Petersburg, PROFIKS Publ., 2002. 156 p.

4. Гончаров Н.А., Башинский В.Ю., Буглай Б.М. Технология изделий из древесины. М.: Лесн. пром-сть, 1990. 528 с. Goncharov N.A., Bashinskiy V.Yu., Buglay B.M. *Technology of Wood Products*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1990. 528 p.

5. Официальный сайт производителя материала Neutrostop АО «Копос колин». Режим доступа: <https://www.kopos.ru/sites/default/files/catalog/2017/10/neutrostop.pdf> (дата обращения: 13.06.21). *The Official Website of the Manufacturer of the Material Neutrostop AO "Kopos kolin"*.

6. Патыкин В.И., Бирман А.Р. Использование древесины для защиты от нейтронных излучений // Материалы 57-й науч. конф. профессоров, преподавателей, науч. работников, инженеров и аспирантов ун-та. СПб.: СПбГАСУ, 2000. С. 86–87. Patyakin V.I., Birman A.R. The Use of Wood for Protection from Neutron Radiation. *Materials of the 57-th Scientific Conference of Professors, Lecturers, Researchers, Engineers and Postgraduates of the University*. Saint Petersburg, SPbGASU Publ., 2000, pp. 86–87.

7. Перелыгин Л.М. Древесиноведение. М.: Сов. наука, 1957. 363 с. Perelygin L.M. *Wood Science*. Moscow, Sovetskaya nauka Publ., 1957. 363 p.

8. Рыдченко Г.Д. Двустороннее прессование древесины // Исследование конструкций и физико-механических свойств материалов. Воронеж: ВЛТИ, 1967. Т. 31. С. 25–28. Rydchenko G.D. Double-Ended Pressing of Wood. *Research of Structures and Physical and Mechanical Properties of Materials*. Voronezh, VLTI Publ., 1967, vol. 31, pp. 25–28.
9. Соколова В.А., Бирман А.Р., Орлов В.В., Тепноев А.В., Кривоногова А.С., Бачериков И.В., Парфенопуло Г.К. Использование железо-водных и дерево-железных смесей в защите от ионизирующих излучений // Системы. Методы. Технологии. 2018. № 1(37). С. 94–99. Sokolova V.A., Birman A.R., Orlov V.V., Tepnoev A.V., Krivonogova A.S., Bacherikov I.V., Parfenopulo G.K. The Use of Iron-Water and Wood-Iron Mixtures in Protection from Ionizing Radiation. *Sistemy. Metody. Tekhnologii* [Systems. Methods. Technologies], 2018, no. 1(37), pp. 94–99. DOI: <https://doi.org/10.18324/2077-5415-2018-1-94-99>
10. Соловьева Т.В., Ревяко М.М., Хмызов И.А. Технология древесных композиционных материалов и изделий. Минск: БГТУ, 2008. 180 с. Solov'yova T.V., Revyako M.M., Khmyzov I.A. *Technology of Wood Composite Materials and Products*. Minsk, BSTU Publ., 2008. 180 p.
11. Тамби А.А., Григорьев И.В., Куницкая О.А. Обоснование необходимости внедрения процессов промышленного лесопиления в структуру лесозаготовительной отрасли // Изв. вузов. Лесн. журн. 2017. № 6. С. 76–88. Tambi A.A., Grigor'ev I.V., Kunitskaya O.A. The Rationale for Implementation of Industrial Sawmilling Processes in the Logging Industry. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2017, no. 6, pp. 76–88. DOI: <https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2017.6.76>
12. Уголев Б.Н. Испытания древесины и древесных материалов. М.: Лесн. пром-сть, 1965. 251 с. Ugolev B.N. *Testing Wood and Wood Materials*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1965. 251 p.
13. Хухрянский П.Н. Дерево вместо металла. Воронеж: ВГЛТА, 1954. 44 с. Khukhryanskiy P.N. *Wood instead of Metal*. Voronezh, VGLTA Publ., 1954. 44 p.
14. Хухрянский П.Н. Прессование древесины. М.: Лесн. пром-сть, 1964. 361 с. Khukhryanskiy P.N. *Wood Pressing*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1964. 361 p.
15. Шамаев В.А. Химико-механическое модифицирование древесины. Воронеж: ВГЛТА, 2003. 260 с. Shamaev V.A. *Chemical and Mechanical Modification of Wood*. Voronezh, VSFTA Publ., 2003. 260 p.
16. Шамаев В.А., Воскобойников И.В., Щелоков В.М. Достижения и проблемы модифицированной древесины // Деревообработка: технологии, оборудование, менеджмент XXI века: тр. IV междунар. евраз. симп. Екатеринбург: УГЛТУ, 2009. С. 224–235. Shamaev V.A., Voskoboynikov I.V., Shchelokov V.M. Achievements and Problems of Modified Wood. *Woodworking: Technologies, Equipment, Management of the XXI Century. Proceedings of the IV International Eurasian Symposium*. Yekaterinburg, USFEU Publ., 2009, pp. 224–235.
17. Шамаев В.А., Никулина Н.С., Медведев И.Н. Модифицирование древесины. М.: ФЛИНТА, 2013. 448 с. Shamaev V.A., Nikulina N.S., Medvedev I.N. *Wood Modification*. Moscow, FLINTA Publ., 2013. 448 p.
18. Шамаев В.А., Скориданов Р.В., Постников В.В. Получение модифицированной древесины с высокими прочностными свойствами // Изв. вузов. Лесн. журн. 2006. № 4. С. 78–83. Shamaev V.A., Skoridanov R.V., Postnikov V.V. Producing Modified Timber with High Strength Properties. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2006, no. 4, pp. 78–83.
19. Шейкман Д.В. Технология модифицирования древесины мягких лиственных пород и березы для напольных покрытий: дис. ... канд. техн. наук. Екатеринбург, 2017. 207 с. Sheykman D.V. *Technology of Modifying Deciduous Wood and Birch Wood for Floor Coverings*: Cand. Eng. Sci. Diss. Yekaterinburg, 2017. 207 p.

-
20. Baily P.J., Preston R.D. Some Aspects of Softwood Permeability. II. Flow of Polar and Non-Polar Liquids through Sapwood and Heartwood of Douglas Fir. *Holzforschung*, 1970, B. 24, H. 2, pp. 37–45. DOI: <https://doi.org/10.1515/hfsg.1970.24.2.37>
21. Baker J.M., Morgan Jn-n, Muller E.R., Savory J.C. Manipulation of Double Vacuum Shedduls in Treatment of Scots Pine Sapwood. *Record of the 1973 Annual Convention of the British Wood Preserving Association*. Cambridge, 1973, pp. 183–199.
22. Bramhall G. The Validity of Darcy Law in the Axial Penetration of Wood. *Wood Science and Technology*, 1971, vol. 5, iss. 2, pp. 121–134. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF01134223>
23. Comstock G.L. Longitudinal Permeability of Green Eastern Hemlock. *Forest Products Journal*, 1965, vol. 15, iss. 10, pp. 441–449.
24. Hammer R.M. De Aethel. *Talanta*, 1980, vol. 27, no. 6, p. 535.
25. *Neutrostop. Export – Import KOVO*. Praha, 1985. 5 p.
26. Practical Vacuum Treating Plant for the Retail Lumber Yard. *Building Supply News*, 1952, no. 1, pp. 58–61.
27. Stamm A.J. Penetration of Hardwoods by Liquids. *Wood Science and Technology*, 1973, vol. 7, iss. 4, pp. 285–296. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF00351074>
28. Sucoff E.J., Chen P.Y.S., Hossfeld R.L. Permeability of Unseasoned Xylem of Northern White Cedar. *Forest Products Journal*, 1965, vol. 15, iss. 8, pp. 321–324.
29. Tambi A.A., Ignatenko S.V., Shinkarenko S.Yu., Kul'kov A.M., Grigor'ev I.V., Yurkova O.V., Sazhin V.E. Study of Wood Glued Joints Formed by Urea Melamine Formaldehyde Binders. *Polymer Science, Series D*, 2019, vol. 12, iss. 1, pp. 51–57. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1995421219010209>