

ТЕХНОЛОГИЯ ЗАГОТОВКИ И МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ДРЕВЕСИНЫ

УДК 674-419.32; 674.049

DOI: 10.53374/1993-0135-2024-1-51-63

Хвойные бореальной зоны. 2024. Т. XLII, № 1. С. 51–63

ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ЛУЩЕНОГО ШПОНА ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ФАНЕРЫ С ПОВЫШЕННЫМИ ПОТРЕБИТЕЛЬСКИМИ СВОЙСТВАМИ

А. И. Криворотова, А. А. Орлов, В. Д. Эскин

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский рабочий», 31
E-mail: tkmkai@mail.ru

В статье приведены результаты сравнительного анализа исследований свойств фанерной продукции на основе карбамидоформальдегидных смол с использованием термообработанного березового лущеного шпона. Проведенные полнофакторные эксперименты показали, что высокие показатели водостойкости и прочности у фанеры на основе термообработанного шпона обеспечиваются при температуре обработки 160 °С и продолжительность 240 мин, у комбинированной фанеры с наружными слоями из термообработанного шпона – при температуре в 200 °С и продолжительности нагрева 180 мин. Использование рекомендованных режимов термообработки шпона, не приводящих к снижению прочности фанеры, приводит к уменьшению показателей водопоглощения и разбухания для комбинированной фанеры на величину до 9 и 44 % соответственно. Установлено, что фанера с наружными слоями из термомодифицированного шпона обладает более высокими прочностными характеристиками в сравнении с фанерой на основе термомодифицированного шпона и незначительно уступает ей в водостойкости. Применение термомодифицированного шпона только для наружных слоев фанерной продукции не приводит к существенному снижению прочностных показателей фанеры, однако позволяет значительно снизить ее гигроскопичность и повысить водостойкость, что расширяет область ее применения.

Ключевые слова: фанера, слоистость, комбинирование, пакет, термомодифицированный лущеный шпон, термообработка, температура, продолжительность, режим, прочность, водопоглощение, разбухание.

Conifers of the boreal area. 2024, Vol. XLII, No. 1, P. 51–63

OPTIMIZATION OF THE PROCESS OF HEAT TREATMENT OF CUT-SHELLED VENEER FOR THE PRODUCTION OF PLYWOOD WITH INCREASED CONSUMER PROPERTIES

A. I. Krivorotova, A. A. Orlov, V. D. Eskin

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology
31, Krasnoyarskii rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation
E-mail: tkmkai@mail.ru

The article presents the results of a comparative analysis of the properties of plywood products based on urea-formaldehyde resins using heat-treated birch shelled veneer. The conducted full-factor experiments have shown that high water resistance and strength indicators of plywood based on heat-treated veneer are provided at a processing temperature of 160 °C and a duration of 240 minutes, for combined plywood with outer layers of heat-treated veneer – at a temperature of 200 °C and a heating duration of 180 minutes. The use of recommended veneer heat treatment modes that do not lead to a decrease in the strength of plywood leads to a decrease in water absorption and swelling rates for combined plywood by up to 9 and 44 %, respectively. It has been established that plywood with outer layers of thermomodified veneer has higher strength characteristics in comparison with plywood based on thermomodified veneer and is slightly inferior to it in water resistance. The use of thermomodified veneer only for the outer layers of plywood products does not lead to a significant decrease in the strength indicators of plywood, however, it can significantly reduce its hygroscopicity and increase water resistance, which expands the scope of its application.

Keywords: plywood, layering, combination, package, thermomodified peeled veneer, heat treatment, temperature, duration, mode, strength, water absorption, swelling.

ВВЕДЕНИЕ

Промышленное понимание процесса термической обработки древесины известно с начала 1950-х годов [1; 2], но несмотря на это, ее применение началось совсем недавно. Этому способствовало постепенное нарастающее увеличение экологической нагрузки на окружающую среду, в результате крупнотоннажного использования биоцидов для обработки и консервации древесины с целью её защиты от дереворазрушающих грибов и насекомых. Образование в древесине грибов неизбежно приводит к появлению гнили. Пораженная гнилью древесина легче впитывает влагу, непредсказуемо изменяет линейные размеры при усушке и разбухании. Термическая модификация является альтернативным способом экологически безопасной защиты древесины от грибов, насекомых и других факторов, разрушающих древесину.

Термическая модификация – это физический процесс, который химически изменяет структуру полимеров клеточной стенки древесины посредством различных химических реакций, придавая материалу новые свойства (гигроскопичность, стабильность размеров, стойкость к разрушающим грибам, уменьшение коробления), при этом его прочность уменьшается в разной степени, в зависимости от режима обработки. Благодаря повышению стойкости к гниющим грибкам, термически обработанная древесина рассматривается как небioцидная альтернатива классическим консервантам для древесины. Помимо этого, термически модифицированная древесина, в зависимости от режимных параметров обработки (продолжительности и температуры), изменяет свой цвет – от светлого до темно-коричневого, однородного по всей толщине материала. Данный эффект открывает широкие возможности использования термодревесины. При помощи термической обработки при использовании малоценных пород, например, березы, осины, сосны, возможно имитировать ценные породы древесины, такие как дуб, карагач, венге [3; 4].

Технологии термической модификации подразумевают термическую обработку древесины при температуре от 160 °С до 280 °С в среде водяного пара или защитного газа. Известно, что свойства и цвет термодревесины в определенной мере можно менять в зависимости от температуры и продолжительности обработки, давления и вида агента обработки, а также от породы и начальной влажности древесины. Но при этом необходимо учитывать, что при улучшении одних характеристик может произойти ухудшение других. Так, в частности, значительное повышение температуры улучшает биостойкость материала, но приводит к росту хрупкости и уменьшению прочности древесины [5].

При увеличении температуры и продолжительности обработки повышается формостабильность материала, но одновременно снижаются прочностные показатели древесины, что ограничивает применение такого материала как конструкционного. С другой стороны, длительная термическая обработка при очень низких температурах не позволяет полноценно модифицировать древесину, а многоступенчатое изменение по сравнению с одноступенчатым может

иметь существенно меньший эффект на формирование заданных свойств материала.

В России термическую модификацию древесины проводят в основном по технологиям зарубежных фирм. В качестве обрабатывающей среды используют водяной пар, как один из самых доступных и эффективных агентов обработки древесины. Другие агенты и среды, как инертный газ, вакуум, перенасыщенный пар не выдерживают конкуренции.

Автором работы [6] предложен способ сокращения энергетических затрат на процесс термомодифицирования древесины. Способ подразумевает постепенный нагрев древесного материала до температуры 200–240 °С и выдержку при заданной температуре в течение 5–7 часов. Нагрев и выдержка при заданной температуре осуществляются в атмосфере топочных газов, которые образуются в результате газификации отходов деревообрабатывающих предприятий и последующего сжигания синтез-газа. Топочные газы охлаждаются в теплообменнике до температуры 200–240 °С. Излишняя тепловая энергия, отведенная при охлаждении топочных газов, направляется для предварительной сушки древесины.

Одним из недостатков термомодифицированной древесины является наличие у готовых материалов явно выраженного запаха жженой древесины. При использовании такого материала на открытом воздухе, данное свойство не имеет сильного значения, однако, при использовании в закрытых помещениях, при отделке жилых комнат и т. д., выделяемый запах становится существенным недостатком.

Известен способ [7] позволяющий получать термомодифицированные материалы, не имеющие запаха жженой древесины. Данная проблема решается тем, что при термической обработке древесных материалов в автоклаве, их нагрева и охлаждения, после загрузки осуществляется вакуумирование до давления 0,2 атм с последующей подачей водяного пара до давления в автоклаве 0,7–0,8 атм. Нагрев древесных материалов ведут водяным паром при температуре 180–220 °С с дальнейшей выдержкой в течение 2–5 часов. Охлаждение осуществляют не менее трех раз путем вакуумирования в течение 15–20 мин с последующей подачей насыщенного водяного пара до значения давления в автоклаве, близкого к атмосферному, и выдержкой при этом давлении в течение 5–10 мин.

Термомодификация древесины на данном этапе развития лесопромышленного комплекса является актуальным и современным способом повышения эксплуатационных характеристик древесных материалов. Основное применение термически модифицированных материалов – строительство и отделка. На основе модифицированной древесины изготавливают полы, облицовку стен и потолков, сайдинг для наружной отделки помещений, оконные рамы. Кроме этого термомодифицированная древесина часто используется при изготовлении садовой мебели и террасной доски.

Изделия на основе полуфабрикатов, изготовленных из древесного сырья, таких как, лущеный и строганый шпон, древесная стружка и шерсть, также широко используются во всех областях деятельности

человека. Фанера на основе шпона из лиственных и хвойных пород древесины является одним из самых востребованных материалов для строительной и мебельной отрасли. Общепризнанным недостатком фанерной продукции является ее водостойкость, которая определяется как породой древесного сырья используемого для изготовления лущеного шпона, так и типом применяемого клеевого состава. Вопрос повышения водостойкости фанеры предлагается решать в том числе и способом термообработки шпона [8; 9]. В работе [10] рассмотрен способ контактного термомодифицирования листов березового шпона в разреженной среде при температуре от 413 до 533 К. Установлено, что давление набухания модифицированных образцов шпона уменьшается, при этом основное влияние на изменение качественных характеристик шпона оказывают температура и продолжительность обработки. Полученная фанера по влагопоглощению соответствует фанере марки ФСФ.

Автором работы [11] предлагается использовать для повышения водоотталкивающих свойств фанеры маслотермообработку. Для пропитки образцов фанеры толщиной 15 мм используется модифицированное талловое масло лиственных пород, далее производится термическая обработка. Температура термообработки 160 °С, продолжительность 2, 4, 6 и 8 ч. В результате, установленный оптимальный режим обработки фанеры позволяет уменьшить ее разбухание в 2 раза, водопоглощение – в 1,2 раза, обеспечив при этом требуемую стандартом прочность. Также установлено, что наибольшее влияние на изменение показателей водопоглощения и разбухания оказывают продолжительность маслопропитки и термообработки фанеры.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ И ОБСУЖДЕНИЕ

На кафедре технологии деревообработки СибГУ им. М. Ф. Решетнева смонтирована и испытана экспериментальная установка для термической модификации древесины на базе сушильного шкафа марки KBCG100/250.

В ходе ранее проводимых экспериментов контроль температуры внутри сушильного шкафа определялся при помощи 2-х термометров сопротивления. По принятому решению 1-й термометр располагался на поверхности образца в его центре, а 2-й термометр у задней стенки сушильного шкафа. Также к сушильному шкафу была подведена увлажняющая труба, чтобы обеспечить парообразование внутри сушильного шкафа.

Опыты показали, что наибольшая температура агента обработки достигается у внутренних стенок шкафа. По результатам полученных данных была разработана и сконструирована тепло-ограждающая конструкция с применением термопласта и строительных уголков, предназначенная обеспечить равномерное и устойчивое расположение образцов и их защиту от теплового излучения с поверхности стенок шкафа. В конструкции были предусмотрены поддерживающие полочки под образцы. Задняя стенка данной конструкции была сделана таким образом, чтобы защищать образцы от теплового излучения, но в тоже вре-

мя свободно пропускать агент обработки, циркулирующий в сушильном пространстве шкафа.

Также ввиду неравномерного распределения температурного поля внутри сушильного пространства шкафа было принято решение о разработке, изготовлении и монтаже осевого вентилятора. Вентилятор был сконструирован и изготовлен таким образом, чтобы обеспечить равномерную циркуляцию агента термообработки. Вентилятор приводился в движение электродвигателем марки АНАТ56В4У4 № 113 ГОСТ 16264–70, который соединялся с осью вентилятора посредством специально изготовленной резиновой муфты.

В 2022 году была проведена модернизация данной установки для достижения следующих целей:

- автоматическое поддержание температуры паровоздушной среды с отклонением ± 5 °С от заданных значений;
- измерение температуры внутри образцов;
- автоматическая подача водяного пара и распыляемой воды;
- автоматическое управление режимом («работа», «пауза») работы вентилятора.

В корпус шкафа смонтировали терморегуляторы ТРМ101 – 2 шт. производства ОБЕН (Москва), реле времени DH48S-S – 2 шт. производства фирмы ZYCN (КНР) и симисторный блок с охлаждением от осевого вентилятора для системы нагрева шкафа. В систему увлажнения и подачи пара поставили соленоидный клапан фирмы Tork.

Модернизация установки позволила практически исключить влияния человеческого фактора на поддержание режима термообработки древесины. Установленные в опыте параметры паровоздушной среды поддерживались путем импульсного нагрева ТЭН шкафа, периодическим включением осевого вентилятора и импульсным увлажнением. Точность поддержания режима термообработки составила ± 5 °С. Однако следует отметить, что в ходе опытов необходимо было периодически изменять (подстраивать) режим работы («продолжительность работы», «продолжительность паузы») осевого вентилятора. В ходе опытов значения температуры в шкафу и температуры образцов заносятся в протокол каждые 10–15 мин.

В ранее опубликованной работе авторов были представлены результаты эксперимента по термической модификации лущеного березового шпона с последующим склеиванием карбамидоформальдегидными клеями [12]. Реализация в работе ПФЭ позволила установить, что качественные изменения характеристик лущеного шпона наблюдались в диапазоне температур от 160 до 200 °С. При температуре менее 160 °С не происходило изменения внешнего вида и плотности шпона, при температуре более 200 °С – потеря плотности шпона становилась значительной. Также установлено, что термообработка шпона, не приводящая к снижению прочности фанеры, позволила снизить показатели водопоглощения и разбухания на величину от 20,4 до 33,5 %. Тем не менее, режимные параметры процесса термообработки шпона в исследуемом диапазоне оказывали существенное влияние на прочностные свойства фанерной продукции. Снизить влия-

ние термообработки на прочностные свойства фанеры было предложено за счет комбинирования в фанерном пакете слоев термообработанного и нетермообработанного лущеного шпона.

В ходе эксперимента процесс термообработки проводился в соответствии с планом Бокса. Принятые обозначения, факторы и уровни их варьирования приведены в табл. 1. В качестве выходных параметров были определены прочность при статическом изгибе, прочность при скалывании, показатели разбухания и водопоглощения. Прессование образцов фанеры осуществлялось по стандартной методике и традиционному режиму прессования фанеры общего назначения марки ФК [13]. Необходимая точность обеспечивалась 5-и кратным дублированием измерений. Для контроля физико-механических свойств образцов использовалась испытательная машина УТС 110 МН-30. Плотность изготовленных образцов фанеры составила от 650 до 680 кг/м³.

Для качественного описания результатов проведенного эксперимента далее в работе условимся о

следующих обозначениях изготовленных образцов клееной фанеры: пятислойную березовую фанеру, изготовленную полностью на основе термомодифицированного шпона и карбамидоформальдегидной смолы, обозначим как «термомодифицированная фанера» или «фанера на основе термомодифицированного шпона»; пятислойную березовую фанеру с наружными слоями из термомодифицированного шпона и внутренними (тремя) слоями из стандартного лущеного шпона обозначим как «фанера комбинированная» или «фанера с наружными слоями из термомодифицированного шпона».

Оценку влияния исследуемых факторов (режима термообработки) на прочностные характеристики фанерной продукции проводили по графической интерпретации уравнения регрессии и графикам эффектов факторов и эффектов их взаимодействий, приведенных на рис. 1–6, 9–14.

В табл. 2 приведены результаты испытания прочности при статическом изгибе фанеры на основе термомодифицированного шпона.

Таблица 1

Факторы и уровни варьирования режима термомодифицирования лущеного березового шпона

Наименование фактора	Обозначение	Уровни варьирования		
		верхний	основной	нижний
		+1	0	–1
Продолжительность термообработки, мин	τ/X_1	240	180	120
Температура агента термообработки, °C	T/X_2	200	180	160

Таблица 2

Результаты испытаний прочности при статическом изгибе фанеры на основе термомодифицированного шпона

X_0	X_1	X_2	Предел прочности на статический изгиб, МПа
1	1	1	29,17
1	–1	1	40,98
1	1	–1	41,50
1	–1	–1	37,06
1	0	1	36,87
1	0	–1	46,05
1	1	0	32,17
1	–1	0	40,73
1	0	0	39,18

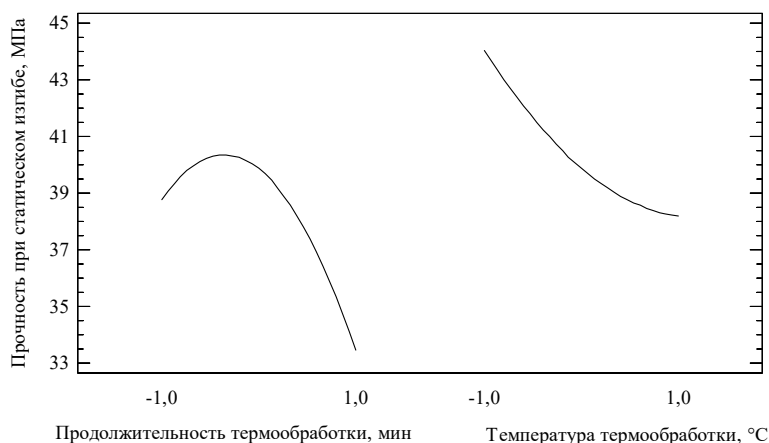


Рис. 1. График эффектов факторов

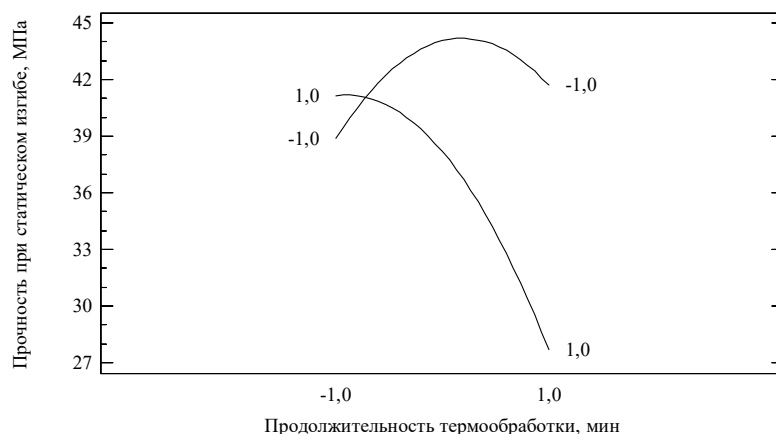


Рис. 2. График эффектов взаимодействия факторов

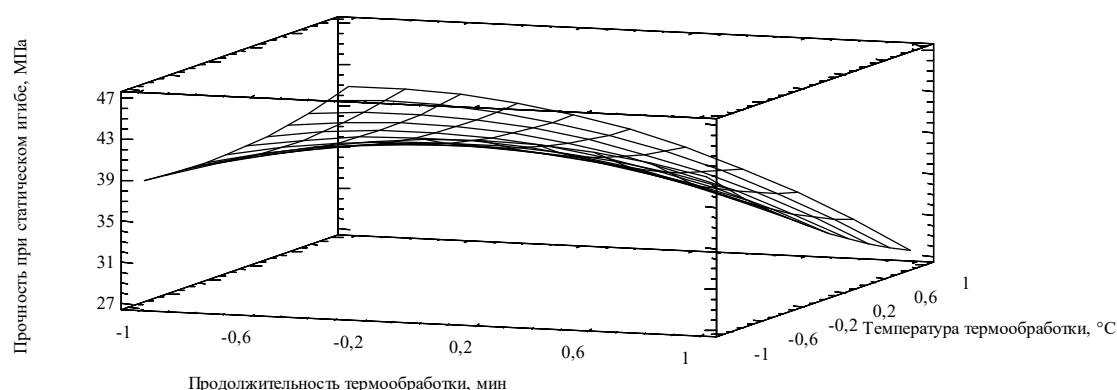


Рис. 3. Поверхность отклика

Приведенные на рис. 1–3 графические зависимости показывают наличие прямо пропорциональных зависимостей между продолжительностью и температурой термообработки и прочностью фанеры при статическом изгибе. С увеличением продолжительности и температуры термообработки наблюдается снижение прочности образцов фанеры. При этом характер изменения прочностных показателей отличается: при определенных условиях (при температуре среднего диапазона равной 180 °C и повышении продолжительности нагрева до 140 мин) прочность термомодифицированной фанеры незначительно увеличивается с последующим снижением, в то время как при увеличении температуры термообработки стабильно уменьшается. При этом увеличение продолжительности при максимальной температуре термообработки (200 °C) приводит к более значительной потере прочности, чем при обработке при минимальной температуре. При увеличении температуры термообработки от 160 до 200 °C прочность фанеры снижается на величину порядка 10–12 МПа (с 43 до 29 МПа). В то же время при увеличении продолжительности термообработки прочность фанеры уменьшается примерно на аналогичную величину, но диапазон значений прочности находится в интервале от 38 до 29 МПа. При этом при температуре термообработки 180 °C и продолжительности 180 мин наблюдается рост прочности фанеры при статическом изгибе. Вероятно, это связано с достижением оптимальных условий термообработки для шпона при данных параметрах. С одной

стороны, под действием термообработки поверхность шпона выравнивается, поры, трещины на поверхности шпона «запечатываются» продуктами термического распада древесины, что обеспечивает оптимальный адгезионный контакт клея с поверхностью шпона и, как следствие, высокую прочность. С другой стороны, в древесине шпона еще не происходит значительной потери массы и, как результат, имеющаяся плотность шпона обеспечивает высокую когезионную прочность в массе термообработанного лущеного шпона. На графическом отображении эффектов взаимодействия факторов наблюдается аналогичная зависимость. При максимальной температуре термообработки и увеличении продолжительности термообработки прочность термомодифицированной фанеры уменьшается, при минимальной температуре с увеличением продолжительности термообработки прочность до определенного временного показателя возрастает, затем снижается.

При оптимизации полученной зависимости с помощью программы «Statgraphics» установлено, что оптимальными параметрами, обеспечивающими максимальную прочность фанеры при статическом изгибе на термомодифицированном шпоне, является температура в 160 °C и продолжительность 240 мин.

В табл. 3 и на рис. 4–6 представлены зависимости прочности при скалывании по клеевому слою от параметров термомодификации шпона.

Таблица 3

Результаты испытаний прочности при скалывании по клеевому слою фанеры на основе термомодифицированного шпона

X_0	X_1	X_2	Предел прочности при скалывании по клеевому слою, МПа
1	1	1	0,99
1	-1	1	2,05
1	1	-1	1,75
1	-1	-1	1,71
1	0	1	2,12
1	0	-1	1,93
1	1	0	1,97
1	-1	0	2,49
1	0	0	1,86

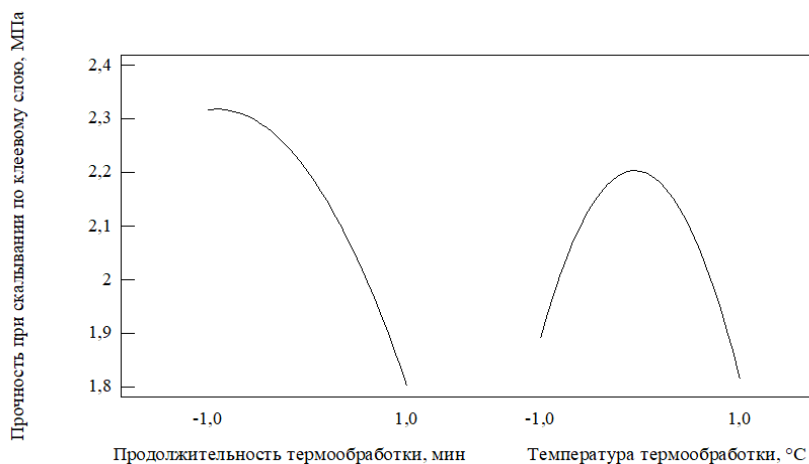


Рис. 4. График эффектов факторов

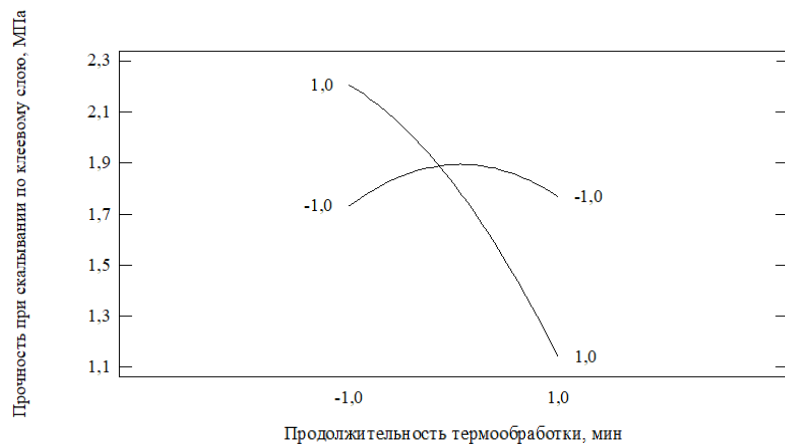


Рис. 5. График эффектов взаимодействия факторов

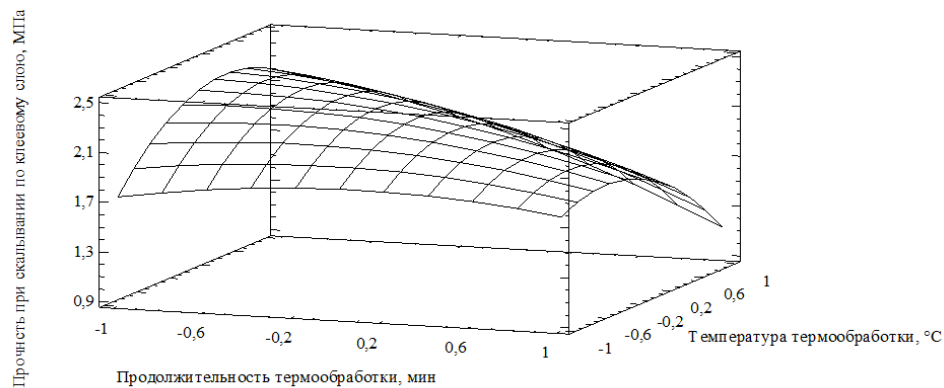


Рис. 6. Поверхность отклика

Анализ данных при испытании термомодифицированной фанеры на показатель прочности при скалывании по клеевому слою показывает аналогичное, рассмотренному выше, снижение прочности при увеличении продолжительности термообработки. В случае с изменением температуры термообработки наблюдается другая зависимость. Увеличение температуры термообработки до 180 °С приводит к повышению прочности фанеры при скалывании по клеевому слою. Это также связано с некоторой потерей плотности шпона в процессе термообработки, что первоначально способствует более глубокому проникновению клеевого состава в шпон и образованию единой монолитной структуры шпона и клея, что, как следствие, ведет к повышению прочности при скалывании. Дальнейшее увеличение температуры термообработки снижает прочность фанеры при скалывании за счет более значительной потери древесины шпона своей массы. Кроме этого на поверхности шпона формируется слой, препятствующего смачиванию поверхности клеем, приводящий к снижению адгезионного контакта между клеем и древесиной.

Данные предположения подтверждаются внешним видом поверхностей разрушения образцов фанеры при скалывании. Разрушение образцов из шпона, обработанного при температуре до 180 °С имеет смешанный характер, последующие образцы имеют когезионный характер разрушения по клеевому слою или по древесине. Также следует отметить, что увеличение продолжительности термообработки при минимальной температуре практически не изменяет прочностные показатели образцов фанеры, а при максимальной температуре увеличение продолжительности термообработки приводит к значительному снижению прочности.

В результате математической обработки экспериментальных данных, были получены уравнения регрессии, адекватно описывающие зависимости предела прочности фанеры от режима термообработки:

– при статическом изгибе

$$\sigma_{\text{изг}} = 39,870 - 2,655 \cdot \tau - 2,931 \cdot T - 3,765 \cdot \tau^2 - 4,062 \cdot \tau \cdot T + 1,245 \cdot T^2;$$

– при скалывании по клеевому слою

$$\sigma_{\text{ск}} = 2,202 - 0,256 \cdot \tau - 0,038 \cdot T - 0,143 \cdot \tau^2 - 0,275 \cdot \tau \cdot T - 0,348 \cdot T^2.$$

Результаты испытаний фанеры на основе термомодифицированного шпона на показатели водопоглощения и разбухания представлены в виде гистограмм на рис. 7 и 8. Сравнение результатов производилось с фанерой, изготовленной на основе исходного лущеного березового шпона, которая имеет максимальные значения показателей водопоглощения и разбухания. При анализе показателей термомодифицированной фанеры необходимо отметить, что и водопоглощение, и разбухание зависят и от температуры, и от продолжительности термообработки шпона. Минимальные показатели водопоглощения и разбухания наблюдаются у фанеры на основе шпона термомодифицированного при температуре 180 °С в течение

180 мин. При параметрах термообработки 160 °С и 180 мин, 200 °С и 120 мин, 200 °С и 180 мин наблюдаются примерно одинаковые показатели водопоглощения, и в диапазоне от 52,92 до 55,60 % для водопоглощения, и в диапазоне от 8,1 до 9,86 % для разбухания. Также низкий показатель разбухания наблюдается для параметров 180 °С и 180 мин. Подобный вид зависимостей для показателей водопоглощения и разбухания может объясняться тем, что при увеличении параметров термообработки до определенных пределов наблюдается совместное действие процессов сужения пор в результате термической усушки и их закупоривания продуктами разложения древесины, однако при дальнейшем повышении параметров термообработки может наблюдаться «прокалка» пор шпона от продуктов разложения, приводящая к некоторому увеличению показателей водопоглощения и разбухания.

Таким образом, показатель водопоглощения образцов изготовленных из термомодифицированного шпона по сравнению с образцами фанеры на основе исходного шпона снижается на величину от 5,6 до 24,0 %. Разбухание снижается на величину от 16,2 до 71,4 %.

В табл. 4 приведены результаты испытания прочности при статическом изгибе комбинированной фанеры с наружными слоями из термомодифицированного шпона. Пакет комбинированной фанеры собирался по стандартной методике, при этом для наружных слоев использовались листы лущеного шпона, прошедшего термообработку в одной партии в соответствии с параметрами, указанными в табл. 1. Прессование и дальнейшая подготовка образцов комбинированной фанеры проводилась при условиях аналогичных изготовлению образцов термомодифицированной фанеры

Приведенные на рис. 9–11 графические зависимости показывают аналогичный характеру изменения прочности термомодифицированной фанеры характер изменения прочности при статическом изгибе для образцов фанеры с наружными слоями из термомодифицированного шпона. Так же, как и в случае испытания образцов фанеры на основе термомодифицированного шпона с увеличением продолжительности и температуры термообработки прочность комбинированной фанеры снижается. Однако следует отметить более высокие значения показателей прочности при статическом изгибе у фанеры с наружными слоями из термомодифицированного шпона в сравнении с фанерой, полностью изготовленной из такого шпона. Например, при максимальных значениях параметров термообработки шпона – продолжительности термообработки 240 мин и температуре 200 °С – прочность образцов термомодифицированной фанеры составила 29,17 МПа, а прочность образцов комбинированной фанеры 36,18 МПа. Это позволяет констатировать, что при использовании термомодифицированного шпона в качестве наружных слоев потеря прочности у фанерных образцов становится значительно меньше.

В табл. 5 и на рис. 12–14 представлены зависимости прочности при скалывании по клеевому слою от параметров термомодификации шпона.

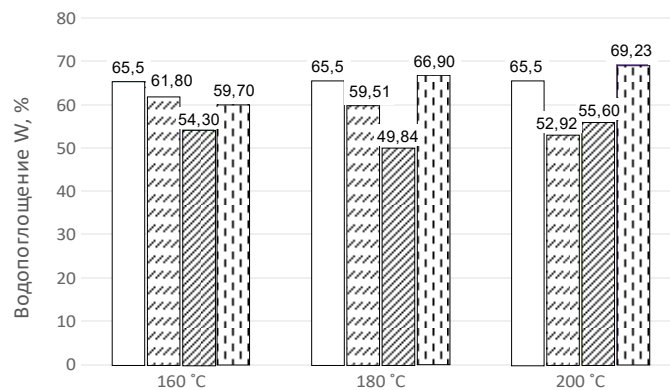


Рис. 7. Результаты испытания образцов фанеры на основе термомодифицированного шпона на водопоглощение:

□ исходный шпон ▨ 2 часа ▩ 3 часа ▤ 4 часа

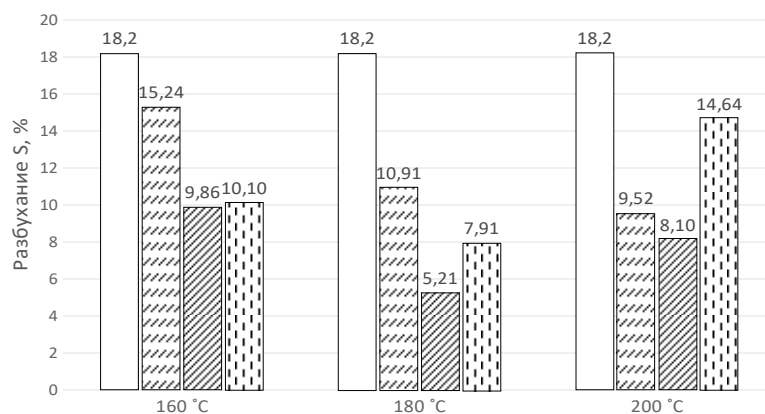


Рис. 8. Результаты испытания образцов фанеры на основе термомодифицированного шпона на разбухание:

□ исходный шпон ▨ 2 часа ▩ 3 часа ▤ 4 часа

Таблица 4

Результаты испытаний прочности при статическом изгибе комбинированной фанеры

X_0	X_1	X_2	Предел прочности при статическом изгибе, МПа
1	1	1	36,18
1	-1	1	48,92
1	1	-1	47,40
1	-1	-1	43,17
1	0	1	42,98
1	0	-1	53,05
1	1	0	38,26
1	-1	0	46,08
1	0	0	45,31

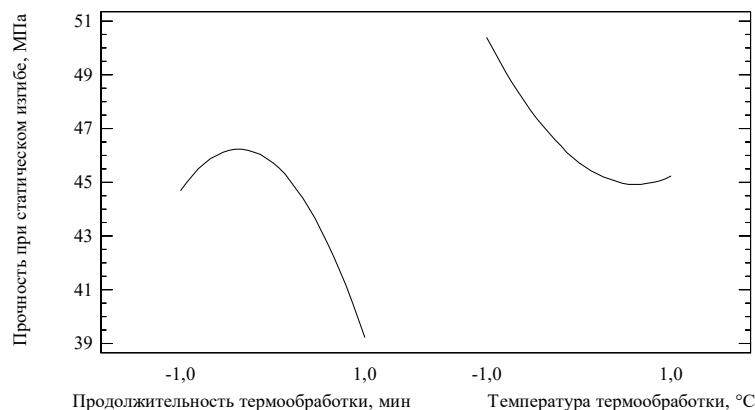


Рис. 9. График эффектов факторов

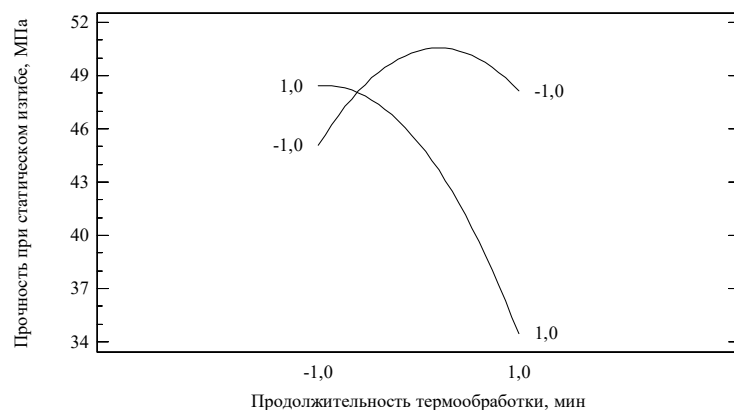


Рис. 10. График эффектов взаимодействия факторов

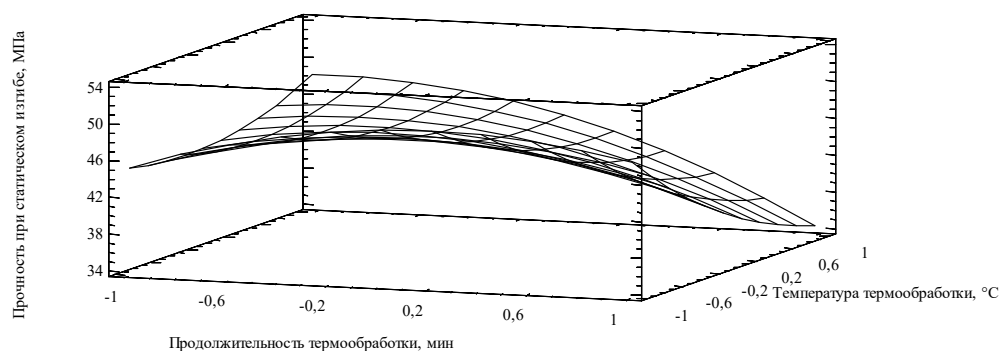


Рис. 11. Поверхность отклика

Таблица 5

Результаты испытаний прочности при скалывании по клеевому слою комбинированной фанеры

X_0	X_1	X_2	Предел прочности при скалывании по клеевому слою, МПа
1	1	1	1,74
1	-1	1	2,7
1	1	-1	1,44
1	-1	-1	2,49
1	0	1	2,84
1	0	-1	3,68
1	1	0	2,7
1	-1	0	3,24
1	0	0	2,6

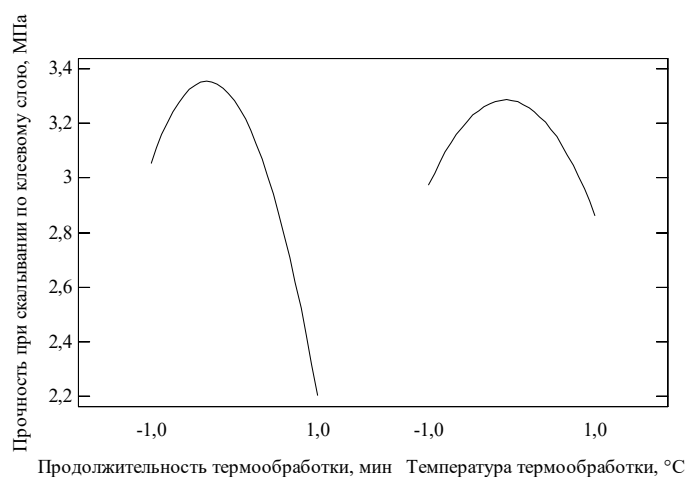


Рис. 12. График эффектов факторов

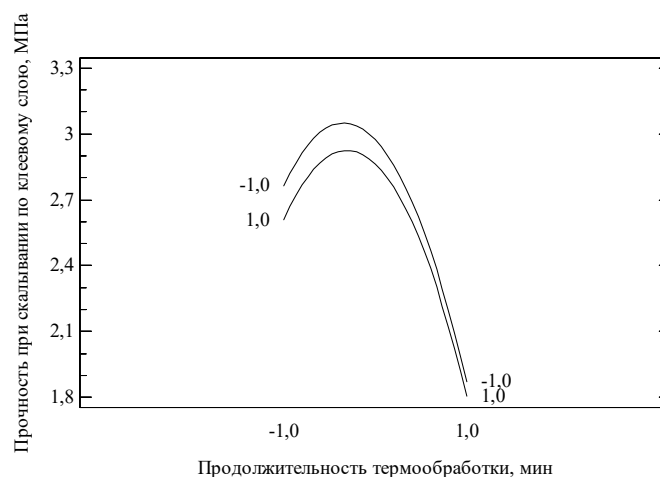


Рис. 13. График эффектов взаимодействия факторов

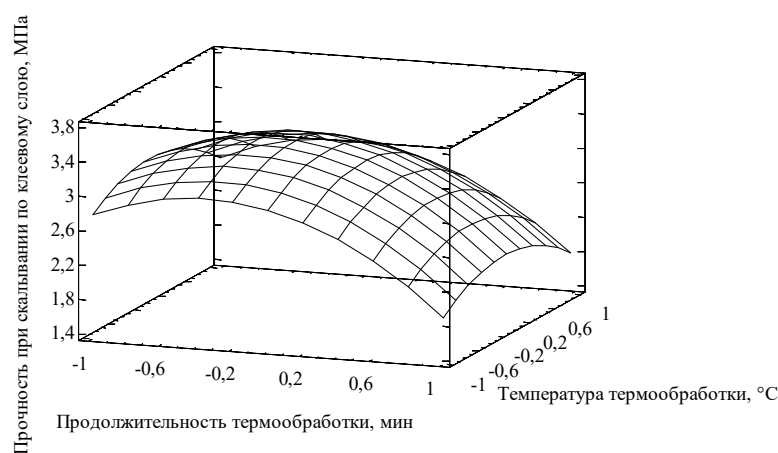


Рис. 14. Поверхность отклика

Испытание на скалывание комбинированной фанеры проводилось по клеевому слою между термомодифицированным и исходным шпоном. График эффектов факторов показывает практически идентичные зависимости прочности от параметров термообработки шпона с некоторым отличием в диапазоне числовых значений. Из графика эффектов взаимодействий факторов видно, что с увеличением продолжительности термообработки прочность при скалывании по клеевому слою вне зависимости от уровня варьирования температуры первоначально незначительно возрастает, затем уменьшается по аналогичной закономерности с максимальной разницей в 0,1 МПа. При этом зависимости прочности при скалывании во всех случаях имеют экстремальный характер, что, также как и в случае с термомодифицированной фанерой можно объяснить первоначально более глубоким проникновением клеевого состава в шпон и образованием единой монолитной структуры шпона и клея с последующим снижением плотности шпона в массе слоя. Следует также отметить, что в данной партии испытаний практически все образцы продемонстрировали смешанный характер разрушения.

При оптимизации полученной зависимости с помощью программы «Statgraphics» установлено, что оптимальными параметрами, обеспечивающими максимальную прочность фанеры на модифицированном шпоне, является температура в 200 °C и продолжительность 180 мин.

Для проведенных испытаний также были получены уравнения регрессии, адекватно описывающие зависимости прочности от режима термообработки:

– при статическом изгибе

$$\sigma_{\text{изг}} = 45,735 - 2,721 \cdot \tau - 2,591 \cdot T - 3,778 \cdot \tau^2 - 4,242 \cdot \tau \cdot T + 2,066 \cdot T^2;$$

– при скалывании по клеевому слою

$$\sigma_{\text{ск}} = 3,283 - 0,425 \cdot \tau - 0,055 \cdot T - 0,655 \cdot \tau^2 - 0,023 \cdot \tau \cdot T - 0,365 \cdot T^2.$$

Результаты испытаний образцов комбинированной фанеры на показатели водопоглощения и разбухания представлены на рис. 15 и 16. При проведении анализа представленных гистограмм, первоначально необходимо отметить менее интенсивный характер сни-

жения значений показателей водопоглощения и разбухания фанеры после выдержки в воде в течение 24 ч. Минимальными значениями водопоглощения и разбухания обладают образцы с наружными слоями из шпона, обработанного при температуре 200 °C в течение 180 и 240 мин. Близкие значения имеют образцы с наружными слоями шпона, обработанного при температуре 160 и 180 °C в течении 240 мин. Для всех образцов с увеличением температуры и продолжительности выдержки наблюдается уменьшение показателей водопоглощения и разбухания. Водопоглощение в зависимости от режима термообработки снижается на величину от 0,6 до 11,6 %, разбухание на величину от 5,4 до 60,3 %. При этом максимальное повышение водостойкости наблюдается у образцов фанеры с наружными слоями из шпона, обработанного при температуре 200 °C. Характер изменения данных показателей несколько отличается от данных, представленных для термомодифицированной фанеры.

ры. Вероятно, это связано с преобладанием в массе материала стандартного лущеного шпона. Наружный слой термомодифицированного шпона выступает в качестве преграды для проникновения влаги во внутрь материала, который в свою очередь имеет по сравнению с термомодифицированным шпоном более плотную структуру и закрытые поры, по сравнению с «прокаленными» порами шпона в полностью термомодифицированной фанере. Поэтому повышение температуры и продолжительности термообработки шпона в случае с его использованием только для наружных слоев фанеры приводит к постоянному снижению водостойкости и разбухания фанеры в отличие от фанеры, изготовленной на полностью термомодифицированном шпоне. Тем не менее, минимальное водопоглощение отмечаемое для комбинированной фанеры около 57,9 %, а для термомодифицированной фанеры – 49,84 %, минимальное разбухание 7,21 % и 5,21 % соответственно.

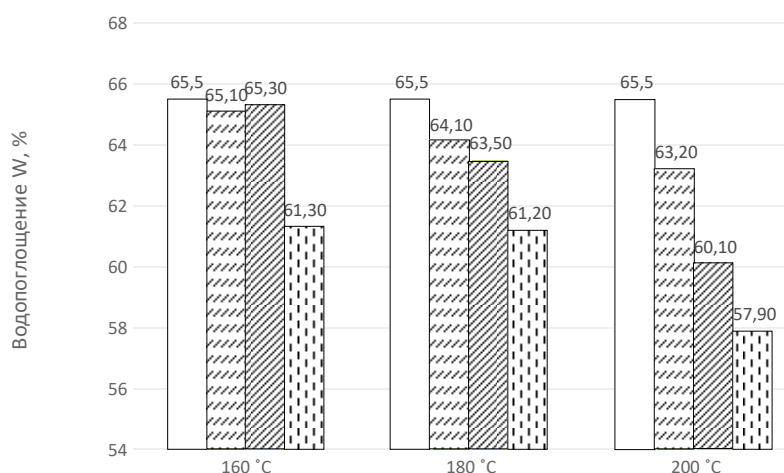


Рис. 15. Результаты испытания образцов комбинированной фанеры с наружными термомодифицированными слоями на водопоглощение:

□ исходный шпон ▨ 2 часа ▩ 3 часа ▤ 4 часа

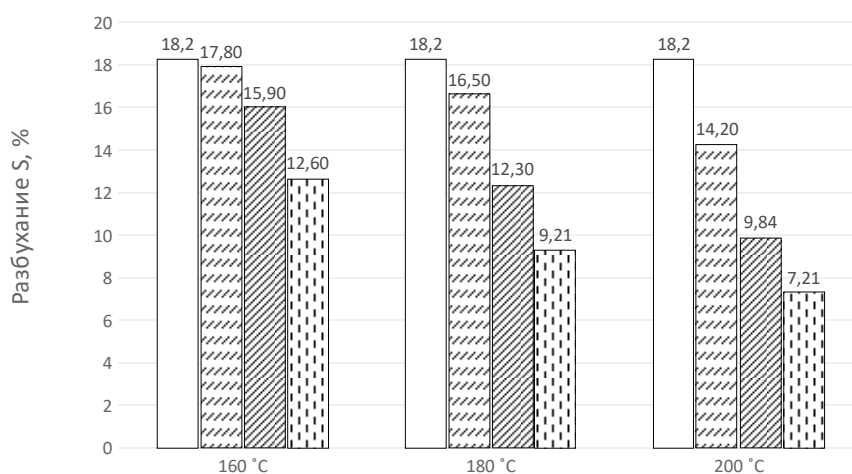


Рис. 16. Результаты испытания образцов комбинированной фанеры с наружными термомодифицированными слоями на разбухание:

□ исходный шпон ▨ 2 часа ▩ 3 часа ▤ 4 часа

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Применение термомодифицированного лущеного шпона для изготовления фанеры, обладающей повышенными показателями водо- и атмосферостойкости, обосновано является одним из способов улучшения ее качественных эксплуатационных показателей.

Реализованный в работе сравнительный анализ проведенных ПФЭ позволил установить, что для получения высоких эксплуатационных характеристик термообработанной фанеры оптимальным режимом термообработки лущеного березового шпона является температура 160 °С и продолжительность 240 мин, для изготовления комбинированной фанеры наружные слои шпона оптимально обрабатывать при температуре в 200 °С в течение 180 мин.

Установлено, что прочность образцов фанеры при статическом изгибе и при скалывании зависит от режима термомодификации шпона и при использовании рекомендованных режимов возрастает.

Термомодифицирование шпона приводит к снижению гигроскопичности, изменению цвета, незначительному изменению плотности и массы образцов фанеры.

Водопоглощение и разбухание более выражено снижается при применении более высоких температур и увеличении продолжительности нагрева. Использование рекомендованных режимов термообработки шпона, не приводящих к снижению прочности фанеры, приводит к уменьшению показателей водопоглощения и разбухания для комбинированной фанеры на величину до 9 и 44 % соответственно.

Использование термомодифицированного шпона только для наружных слоев фанерной продукции не приводит к существенному снижению прочностных показателей фанеры, однако позволяет значительно снизить ее гигроскопичность и повысить водостойкость.

Фанера с наружными слоями из термомодифицированного шпона обладает более высокими прочностными характеристиками в сравнении с фанерой на основе термомодифицированного шпона и незначительно уступает ей в водостойкости. При сравнении стоимости данных видов фанеры, фанера, комбинированная с наружными слоями из термомодифицированного шпона, имеет значительное преимущество перед полностью термомодифицированной фанерой.

Применение для наружных слоев фанеры термомодифицированного шпона позволяет значительно расширить область её применения за счет повышения водостойкости.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. P. Bekhta, P. Niemz, *Holzforsch*, 57, 5, 539–546 (2003).
2. Guide to heat treatment of wood (2003) [Электронный ресурс]. URL: www.thermowood.fi (дата обращения: 23.03.2023).
3. Свойства и характеристики термоберезы [Электронный ресурс]. URL: <https://woodneva.ru/info/svoystva-i-harakteristiki-termoberezy> (дата обращения: 05.06.2023).

4. Термически модифицированная древесина. Ирина Железняк, Собкор интернет-издания «AtmWood. Дерево-промышленный вестник» [Электронный ресурс]. URL: <https://atmwood.com.ua/2018/10/20/termicheski-modifitsirovannaya-drevesina-xarakteristiki-i-primenenie/?ysclid=lo1hk8l0xe734054300> (дата обращения: 10.08.2023).

5. Шайхутдинова А. Р., Сафин Р. Р. Термодревесина: дизайн и технология // Труды Академии технической эстетики и дизайна. 2016. № 1. С. 5–9.

6. Патент № 2422266 РФ, МПК В 27 К 5/00. Способ термообработки древесины / Сафин Р. Р., Сафин Р. Г., Разумов Е. Ю., Тимербаев Н. Ф., Кайнов П. А. и др.; патентообладатель ООО «НТЦ РПО»; опубл. 27.06.2011.

7. Патент № 2453425 РФ, МПК В 27 К 3/02. Способ термической обработки древесины / Сафин Р. Р., Хасаншин Р. Р., Кайнов П. А. и др.; патентообладатель ГОУ ВПО КГТУ; опубл. 20.06.2012.

8. Хасаншин Р. Р., Зиятдинов Р. Р. Повышение эксплуатационных характеристик клееных материалов, созданных на основе термообработанного шпона // Вестник Казанского технологического университета. Казань. 2013. № 13. С. 87–90.

9. Разработка технологии создания влагостойкой фанеры / Р. Р. Сафин, Р. Р. Хасаншин, Р. Р. Зиятдинов [и др.] // Вестник Казанского технологического университета. 2012. Т. 15, № 20. С. 64–65.

10. Зиятдинов Р. Р. Технология производства влагостойкой фанеры из термомодифицированного шпона : автореф. дис. ... канд. техн. наук, Казанский государственный технологический университет, Казань, 2013. 18 с.

11. Матюшенкова Е. И. Совершенствование эксплуатационных свойств фанеры для строительства путем маслотермообработки : автореф. дис. ... канд. техн. наук. Санкт-Петербург, 2012. 16 с.

12. Исследование свойств клеёных материалов на основе термически модифицированного шпона / Криворотова А. И., Орлов А. А. Текст: непосредственный // Хвойные бореальной зоны. 2018. № 6. С. 548–554.

13. Справочник фанерщика. Сост. коллективом сотрудников ЦНИИФ / под ред. канд. техн. наук И. А. Шейдина, изд. 3-е испр. и доп., изд-во «Лесная промышленность», 1968. 832 с.

REFERENCES

1. Bekhta P., Niemz P., *Holzforsch*, 57, 5, 539–546 (2003).
2. Guide to heat treatment of wood (2003) [Elektronnyy resurs]. URL: www.thermowood.fi (data obrashcheniya: 23.03.2023).
3. Svoystva i kharakteristiki termoberezy [Elektronnyy resurs]. URL: <https://woodneva.ru/info/svoystva-i-harakteristiki-termoberezy> (data obrashcheniya: 05.06.2023).
4. Termicheski modifitsirovannaya drevesina. Irina Zheleznyak, Sobkor internet-izdaniya “AtmWood. Derevo-promyshlennyy vestnik” [Elektronnyy resurs]. URL: <https://atmwood.com.ua/2018/10/20/termicheski-modifitsirovannaya-drevesina-xarakteristiki-i-primenenie/?ysclid=lo1hk8l0xe734054300>

primeneniye/?ysclid=lo1hk8l0xe734054300 (data obra-shcheniya: 10.08.2023).

5. Shaykhutdinova A. R., Safin R. R. Termodre-vesina: dizayn i tekhnologiya // Trudy Akademii Tekhnicheskoy Estetiki i Dizayna. 2016. № 1. S. 5–9.

6. Patent № 2422266 RF, MPK V 27 K 5/00. Sposob termoobrabotki drevesiny / Safin R. R., Safin R. G., Razumov E. Yu., Timerbaev N. F., Kaynov P. A. i dr.; patentoobladatel' OOO "NTTs RPO"; opubl. 27.06.2011.

7. Patent № 2453425 RF, MPK V 27 K 3/02. Sposob termicheskoy obrabotki drevesiny / Safin R. R., Khasanshin R. R., Kaynov P. A. i dr.; patentoobladatel' GOU VPOKGTU; opubl. 20.06.2012.

8. Khasanshin P. P., Ziatdinov P. P. Povyshenie ekspluatatsionnykh kharakteristik kleennykh materialov, sozdannykh na osnove termoobrabotannogo shpona // Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta. Kazan'. 2013. №. 13. S. 87–90.

9. Razrabotka tekhnologii sozdaniya vlagostoykoy fanery / R. R. Safin, R. R. Khasanshin, R. R. Ziatdinov [i dr.] // Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta. 2012. T. 15, № 20. S. 64–65.

10. Ziatdinov R. R. Tekhnologiya proizvodstva vlagostoykoy fanery iz termomodifitsirovannogo shpona // Avtoreferatdiss. kand. tekhn. nauk, Kazanskiy gosudarstvennyy tekhnologicheskiiy universitet, Kazan', 2013. 18 s.

11. Matyushenkova E. I. Sovershenstvovanie ekspluatatsionnykh svoystv fanery dlya stroitel'stva putem maslotermoobrabotki : avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk. Sankt-Peterburg, 2012. 16 s.

12. Krivorotova A. I., Orlov A. A. Issledovanie svoystv kleennykh materialov na osnove termicheskii modifitsirovannogo shpona. Tekst: neposredstvennyy // Khvoynye boreal'noy zony. 2018. № 6. S. 548–554.

13. Spravochnik fanershchika. Sost. kolektivom sotrudnikov TsNIIF / pod redaktsiey kand. tekhn. nauk I. A. Sheydina, izd. 3-e ispr. i dop. Izd-vo "Lesnaya promyshlennost'", 1968. 832 s.

© Криворотова А. И., Орлов А. А.,
Эскин В. Д., 2024

Поступила в редакцию 31.10.2023
Принята к печати 22.01.2024