

ТЕХНОЛОГИИ И МАШИНЫ ЛЕСНОГО ДЕЛА

УДК 674.816.3.004.12

С. А. Угрюмов, А. А. Федотов

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА СВОЙСТВА ДРЕВЕСНО-СТРУЖЕЧНЫХ ПЛИТ НА ОСНОВЕ ФУРАНОВОЙ СМОЛЫ

Установлены рациональные условия производства древесных плит на основе фурановой смолы. Путем реализации В-плана второго порядка изучено комплексное влияние основных технологических факторов на физико-механические свойства древесно-стружечных плит, изготовленных с применением фуранового олигомера. Приведена матрица планирования эксперимента с выходными характеристиками, адекватные уравнения регрессии, основные графические зависимости.

Ключевые слова: *В-план, эксперимент, управляемые факторы, уровни варьирования факторов, матрица планирования эксперимента, уравнения регрессии, адекватность, эффективность математической модели, рациональные условия производства плит.*

Введение. Древесно-стружечные плиты в настоящее время широко применяются в строительстве, мебельной промышленности, авто-, вагоно-, контейнеростроении и иных сферах, однако их эксплуатационные свойства не всегда в полной мере удовлетворяют требованиям потребителей. Основная часть древесных плит, выпускаемых как российскими, так и зарубежными производителями, обладает недостаточной водостойкостью, что ограничивает их применение в условиях с переменными температурно-влажностными условиями, повышенной горючестью, недостаточными прочностными характеристиками.

Основная часть древесных плит выпускается с применением формальдегидосодержащих смол (карбамидоформальдегидных, фенолформальдегидных). В процессе изготовления и эксплуатации таких плит выделяется свободный, непрореагированный в процессе отверждения формальдегид, обладающий, прежде всего, канцерогенным действием. Несмотря на постоянное ужесточение норм к выделениям токсичных веществ из древесно-полимерных композиционных материалов, массово применяемые плиты в большинстве случаев не удовлетворяют требуемым экологическим параметрам.

Основным методом повышения эксплуатационных свойств древесно-полимерных композиционных материалов является применение для склеивания древесных частиц наполнителя клеев с повышенными адгезионными характеристиками и малой токсич-

ностью. В настоящее время в производстве древесных плит специального назначения (прочных, водостойких, малотоксичных) в мировой практике применяют меламиноформальдегидные смолы. В процессе их отверждения основная часть свободного формальдегида связывается, однако токсичные выделения имеют место быть.

Кардинальным способом повышения эксплуатационных характеристик плит является применение альтернативных клеев, не содержащих формальдегид, обладающих высокими адгезионными свойствами. Одним из таких представителей являются фурановые смолы [1]. Известно, что в отвержденном состоянии фурановые смолы обладают повышенной водостойкостью, хорошей химической стойкостью (выдерживают воздействие высококонцентрированных растворов большинства кислот и щелочей даже при высокой температуре), высокой теплостойкостью, механическими и диэлектрическими свойствами [2]. Незначительная пористость отвержденного полимера обеспечивает материалам непроницаемость для воды, а также нефтепродуктов и газов.

В данных олигомерах отсутствуют легколетучие токсичные компоненты; опасность интоксикации фурфуролом (основным компонентом данных смол) и его производными маловероятна вследствие низкой летучести этих продуктов при комнатной температуре; предельно допустимые концентрации используемых при синтезе веществ (фурфуrolа и ацетона) гораздо выше, ниже их класс опасности. Древесные плиты, изготовленные с применением фурановых смол, по экологическим показателям превосходят плиты, изготовленные с применением фенол- и формальдегидсодержащих смол [3]. В настоящее время фурановые связующие ограниченно используются преимущественно в строительстве для получения высокопрочных и стойких материалов, а также для модификации древесины, с целью улучшения био- и огнестойкости и других физико-механических показателей.

Представляет интерес оценка физико-механических свойств древесно-стружечных плит, изготовленных с использованием фурановых смол и определение рациональных технологических режимов их производства.

Цель работы – определение рациональных режимов производства древесно-стружечных плит на основе фурановой смолы (фурфуrolацетонного мономера ФА) путем реализации В-плана второго порядка.

Решаемые задачи – выбор управляемых факторов и уровней их варьирования, построение матрицы планирования эксперимента, проверка однородности дисперсий, написание уравнений регрессии и проверка значимости коэффициентов, проверка адекватности и эффективности математических моделей, проведение оптимизации математических моделей.

Методика проведения экспериментальных исследований. При производстве лабораторных образцов древесно-стружечных плит на основе как лиственных, так и хвойных пород древесных частиц использовался клей на основе фурфуrolацетонного мономера ФА и отвердителя (п-толуолсульфоkислоты) в количестве 5 % от массы жидкой смолы. Изготовление плит проводилось в лабораторном прессе П100-400 при следующих постоянных факторах:

- толщина плиты – 16 мм;
- удельное давление прессования – 2 МПа;
- время выдержки под давлением – 0,5 мин на 1 мм толщины (6,5 мин для плиты, толщиной 16 мм);
- время плавного снижения давления – 1 мин.

Выбор управляемых факторов, построение плана экспериментальных исследований. Анализ результатов предварительно проведенных экспериментов показал,

что на физико-механические показатели плит, изготовленных на основе фурановой смолы, наиболее существенное влияние оказывают следующие факторы: температура плит пресса, расход связующего, плотность плит. Эти факторы в данном эксперименте приняты в качестве управляемых.

Уровни варьирования управляемых факторов представлены в табл. 1.

Таблица 1

Управляемые факторы и уровни их варьирования

Наименование факторов	Обозначение		Интервал варьирования	Уровень варьирования		
	Натуральное	Нормализованное		Нижний (-1)	Основной (0)	Верхний (+1)
1. Температура прессования, °С	T	x_1	100	160	180	200
2. Расход связующего, %	$P_{св}$	x_2	4	8	12	16
3. Плотность плиты, кг/м ³	ρ	x_3	100	650	750	850

В качестве выходных величин приняты основные физико-механические показатели, характеризующие эксплуатационные характеристики плит: предел прочности при статическом изгибе, разбухание по толщине. Отбор образцов и проведение испытаний осуществлялись по действующим стандартным методикам.

Матрица планирования эксперимента с выходными величинами представлена в табл. 2. Выходные величины определены как средние значения, определенные по результатам пяти дублированных опытов.

Оценка полученных результатов на основе определения критерия Стьюдента показала, что в рассмотренных выборках грубых ошибок нет.

Проверка однородности дисперсий проводилась при следующих факторах: уровень значимости $q = 0,05$; число выборок $m=14$, число степеней свободы $f=n-1=4$.

Расчеты показали, что дисперсии всех опытов являются однородными.

В результате математической обработки данных [4] получены следующие уравнения регрессии:

- для плит на основе стружки лиственных пород:

а) выходная величина – предел прочности при изгибе:

$$Y_1 = 15,46 + 3,67x_1 + 4,13x_2 + 1,51x_3 - 0,55x_1^2 + 0,66x_1x_2 + 0,037x_1x_3 + 0,012x_2x_3;$$

б) выходная величина – разбухание по толщине:

$$Y_2 = 15,31 - 6,61x_1 - 8,19x_2 + 1,11x_3 + 2,89x_1^2 + 6,20x_2^2 + 1,19x_3^2 - 2,73x_1x_2 - 0,73x_1x_3;$$

- для плит на основе стружки хвойных пород:

а) выходная величина – предел прочности при изгибе:

$$Y_3 = 21,18 + 3,74x_1 + 4,76x_2 + 1,43x_3 - 0,57x_1^2 - 0,67x_2^2 + 0,23x_1x_3 - 0,50x_2x_3;$$

б) выходная величина – разбухание по толщине:

$$Y_4 = 11,72 - 5,0x_1 - 6,47x_2 + 1,07x_3 + 2,13x_1^2 + 4,88x_2^2 - 1,81x_1x_2.$$

После проверки математических моделей на адекватность и эффективность была проведена оптимизация полученных моделей с использованием пакета программ Microsoft Office Excel (поиск решения).

Таблица 2

Матрица планирования эксперимента

№ опыта	Управляемые факторы						Выходные величины			
	В кодированном обозначении			В натуральном обозначении			Для плит на основе лиственных частиц		Для плит на основе хвойных частиц	
	x_1	x_2	x_3	Т, °С	Р _{св} , %	ρ, кг/м ³	Y ₁ - предел прочности при изгибе, МПа	Y ₂ - разбухание по толщине, %	Y ₃ - предел прочности при изгибе, МПа	Y ₄ - разбухание по толщине, %
1	-1	-1	-1	160	8	650	5,9	35,8	9,9	28,1
2	+1	-1	-1	200	8	650	11,8	29,5	16,1	20,3
3	-1	+1	-1	160	16	650	12,8	24,9	19,6	17,4
4	+1	+1	-1	200	16	650	21,4	7,7	27,1	5,7
5	-1	-1	+1	160	8	850	8,8	39,5	12,1	28,2
6	+1	-1	+1	200	8	850	14,9	30,3	21,2	24
7	-1	+1	+1	160	16	850	15,8	28,6	21,8	21,6
8	+1	+1	+1	200	16	850	24,5	8,4	28,2	6,8
9	-1	0	0	160	12	750	11,2	24,8	16,5	19,6
10	+1	0	0	200	12	750	18,6	11,6	24,7	8,1
11	0	-1	0	180	8	750	11,1	29,7	15,4	24,4
12	0	+1	0	180	16	750	19,3	13,3	25,6	8,8
13	0	0	-1	180	12	650	13,8	15,4	18,9	11,2
14	0	0	+1	180	12	850	16,8	17,6	22,6	12,8

Целевые функции:

$\sigma_{и} \rightarrow \max$;

$P_s \rightarrow \min$.

Ограничения:

$$\left\{ \begin{array}{l} 160 \leq t \leq 200 \text{ } ^\circ\text{C}; \\ 8 \leq P_{св} \leq 16 \text{ } \%; \\ 650 \leq \rho \leq 850 \text{ кг/м}^3. \end{array} \right.$$

В результате определены рациональные параметры производства древесно-стружечных плит:

- температура прессования – 180...200 °С;
- расход связующего – 12...16 % от массы абсолютно сухой стружки;
- плотность плит – 700...850 кг/м³.

При изготовлении плит при данных технологических условиях возможно получение материала с характеристиками, соответствующими ГОСТ 10632-07:

- для плит на основе стружки лиственных пород:

предел прочности при изгибе – 14,7...25,3 МПа;

разбухание по толщине – 15,0...8,4 %;

- для плит на основе стружки хвойных пород:

предел прочности при изгибе – 20,5...29,6 МПа;

разбухание по толщине – 11,2...6,5 %.

Для примера на рис. 1, 2 приведены некоторые графические зависимости влияния технологических факторов на свойства плит на основе хвойных пород древесины.

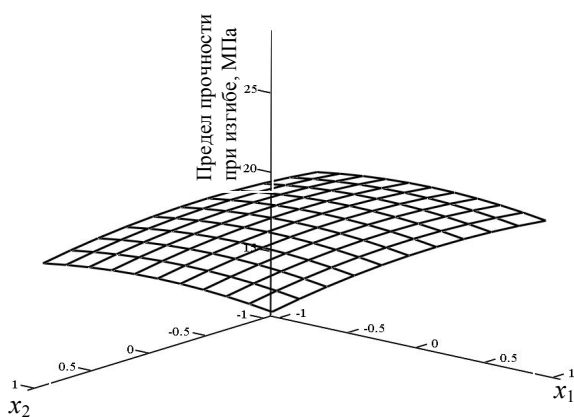


Рис. 1. Зависимость предела прочности плит на основе стружки хвойных пород при изгибе (Y_1) от температуры прессования (x_1) и количества связывающего (x_2)

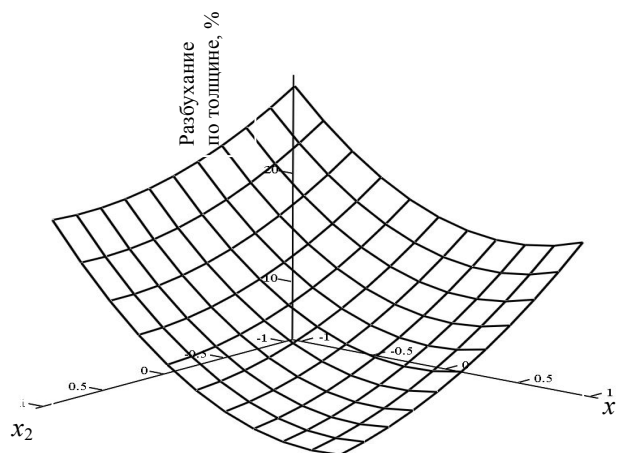


Рис. 2. Зависимость разбухания плит на основе стружки хвойных пород от температуры прессования (x_1) и количества связывающего (x_2)

После проверки математических моделей на адекватность и эффективность была проведена оптимизация полученных моделей с использованием пакета программ Microsoft Office Excel (поиск решения).

Целевые функции:

$\sigma_{и} \rightarrow \max$;

$P_s \rightarrow \min$.

Ограничения:

$$\begin{cases} 160 \leq t \leq 200 \text{ }^\circ\text{C}; \\ 8 \leq P_{\text{св}} \leq 16 \text{ } \%; \\ 650 \leq \rho \leq 850 \text{ кг/м}^3. \end{cases}$$

В результате определены рациональные параметры производства древесно-стружечных плит:

- температура прессования – 180...200 °С;
- расход связующего – 12...16 % от массы абсолютно сухой стружки;
- плотность плит – 700...850 кг/м³.

При изготовлении плит при данных технологических условиях возможно получение материала с характеристиками, соответствующими ГОСТ 10632-07:

- для плит на основе стружки лиственных пород:
предел прочности при изгибе – 14,7...25,3 МПа;
разбухание по толщине – 15,0...8,4 %;
- для плит на основе стружки хвойных пород:
предел прочности при изгибе – 20,5...29,6 МПа;
разбухание по толщине – 11,2...6,5 %.

Интерпретация результатов эксперимента. Анализ полученных регрессионных моделей и графических зависимостей показал, что на прочностные показатели плит на основе фурановой смолы в большей степени влияет количество связующего. Повышение расхода связующего приводит к лучшему распределению его по поверхности всех частиц и способствует формированию большего количества непрерывных клеевых связей. Значимое влияние на прочность оказывает температура прессования, с увеличением которой происходит более полное отверждение связующего. При увеличении плотности плит происходит более плотная упаковка древесных частиц между собой, практически без образования свободных пространств, ослабляющих структуру материала, то есть повышается «монолитность» материала и, следовательно, прочность.

На разбухание плит на основе фурановой смолы наибольшее влияние оказывает количество связующего, с увеличением которого происходит более полная изоляция древесных частиц от контакта с водой. Значимое влияние оказывает температура прессования, при увеличении которой повышается водостойкость клеевого шва за счет более полного отверждения связующего. При увеличении плотности плит значения разбухания несколько ухудшаются за счет большего уплотнения частиц и их релаксации при контакте с водой.

Выводы. На основании результатов реализации В-плана второго порядка найдены рациональные условия производства плит на основе фурановой смолы (фурфуролацетонного мономера ФА), при поддержании которых возможно производство древесных плит с характеристиками, соответствующими ГОСТ 10632-07.

Список литературы

1. Угрюмов, С.А. Фурановые олигомеры в производстве фанеры и древесных плит / С.А. Угрюмов // Клеи. Герметики. Технологии. – 2008. – № 10. – С. 14-16.
2. Азаров, В.И. Полимеры в производстве древесных материалов / В.И. Азаров, В.Е. Цветков. – 2-е изд. – М. : МГУЛ, 2006. – 236 с.
3. ГОСТ 12.1.005-88. Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны. – Взамен ГОСТ 12.1.005-76; введ. 1989-01-01. Переиздан 2002. – М. : Система стандартов безопасности труда: ИПК Изд-во стандартов, 2002. – 71 с.
4. Пижурин, А.А. Основы научных исследований в деревообработке / А.А. Пижурин, А.А. Пижурин. – М. : МГУЛ, 2005. – 305 с.

Статья поступила в редакцию 28.08.12.

S. A. Ugrumov, A. A. Fedotov

**ASSESSMENT OF TECHNOLOGICAL FACTORS IMPACT ON
CHARACTERISTICS OF FURAN RESIN CHIPBOARDS**

Rational conditions of wood boards production on the base of furan resin are determined. By means of realization of B-plan of the second order, a complex impact of the basic technological factors on physic and mechanical characteristics of chipboards, manufactured with the use of furan oligomer, is studied. A matrix of planning of experiments with output characteristic, adequate regression equations and basic characteristic curves is given.

Key words: *B-plan, experiment, manageable factors, levels of variation of factors, matrix of planning of experiment, regression equation, adequacy, efficiency of mathematical model, rational conditions of boards production.*

УГРЮМОВ Сергей Алексеевич – доктор технических наук, профессор кафедры механической технологии древесины Костромского государственного технологического университета (Россия, Кострома). Область научных интересов – техника и технологии производства синтетических олигомеров, клееных древесных материалов. Автор более 200 публикаций.

E-mail: ugr-s@yandex.ru

ФЕДОТОВ Александр Андреевич – аспирант кафедры механической технологии древесины Костромского государственного технологического университета (Россия, Кострома). Область научных интересов – технологические процессы производства клееных древесных материалов. Автор семи публикаций.

E-mail: aafedotoff@yandex.ru