

рованные гетерогенные реакции и морской аэрозоль. Изв. Вузов. Физика. 2008. № 11/3. С. 181-185.

11. Губарева Т.В. Разработка физической модели гетерогенного взаимодействия атмосферного аэрозоля. Системы. Методы. Технологии. 2011. № 2 (10). С. 73-77.

12. Губарева Т.В. Губарева. Изучение образования нитратов щелочных металлов в атмосфере. Системы. Методы. Технологии. 2011. № 2 (10). С. 149-154.

УДК 674.816.3

С.В. Денисов*, Г.П. Плотникова, Н.П. Плотников

ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА В ПРОИЗВОДСТВЕ ДРЕВЕСНОСТРУЖЕЧНЫХ ПЛИТ

Выявлены основные закономерности влияния технологических факторов при производстве древесностружечных плит с использованием в составе сырья отходов некондиционной древесины на их качественные показатели, построены математические модели, проведена их комплексная оптимизация.

Ключевые слова: древесностружечные плиты, отходы из некондиционной древесины, оптимизация, математическая модель.

Важнейшей составной частью научных исследований является построение математической модели объекта. Математическая модель является инструментом исследования: она позволяет получить информацию о самом объекте, способах управления им. С помощью модели легко оценить степень и результаты влияния каждого из варьируемых факторов на характеристики объекта, отыскать оптимальные режимы его функционирования.

Для решения поставленных задач использовались методы математического планирования. Для получения математического описания влияния основных технологических параметров процесса производства древесностружечных плит (ДСтП) на физико-механические характеристики и обеспечения достоверного математического описания объекта наиболее эффективным является многофакторный эксперимент, позволяющий при переходе к каждому последующему опыту варьировать все факторы одновременно.

Для построения математической модели процесса с количественными факторами, проверки ее адекватности и для оценки влияния на процесс каждого варьируемого

фактора использован регрессионный анализ. Для получения регрессионных зависимостей был реализован композиционный *B*-план второго порядка, достоинствами которого являются:

- потребность в проведении сравнительно небольшого числа опытов;
- возможность получить отдельные оценки парных взаимодействий параметров, линейных и квадратичных эффектов;
- возможность вычисления коэффициентов регрессии по простым формулам и получения значений, статистически независимых друг от друга;
- возможность получения уравнения регрессии с одинаковой погрешностью выходного параметра на одном и том же расстоянии от центра эксперимента вне зависимости от сочетания входных факторов [1].

B-план состоит из двух точек полного факторного плана, к которым добавлено 2К звездных точек.

В качестве выходных величин были приняты качественные показатели готовой продукции [2]: Y_1 – предел прочности ДСтП при статическом изгибе ($\sigma_{изг.}$), МПа; Y_2 – предел прочности ДСтП при растяжении пер-

* - автор, с которым следует вести переписку.

пендикулярно пласти (σ_{\perp}), МПа; Y_3 – разбухание ДСтП по толщине за 24 ч., %;

Варьируемые технологические факторы:

X_1 – содержание некондиционного сырья в совокупности со стружкой-отходом от оцилиндровки круглых лесоматериалов в составе внутреннего слоя, %/%, и, соответственно, содержание некондиционного сырья в совокупности с гидролизным лигнином в составе внутреннего слоя, %/%.

X_2 – содержание парафино-буроугольной эмульсии во внутреннем слое, изготовленной при соотношении компонентов 60/40, масс. %.

X_3 – продолжительность прессования, τ_1 , мин.

Изготовление стружки осуществлялось на производственном оборудовании – центробежных стружечных станках. Дозирование клеевой массы и смешивание со стру-

жечной массой осуществлялись на лабораторном мини-смесителе. Горячее прессование проводилось на лабораторном мини-прессе – аналоге головной прессовой установки по работе гидравлической системы и программного обеспечения [2].

В табл. 1 представлены варьируемые факторы в натуральном и кодовом обозначении, их уровни и интервалы варьирования при проведении многофакторного эксперимента.

Полученные усредненные результаты экспериментов (выходных параметров) представлены в матрицах планирования эксперимента по *B*-композиционному плану второго порядка в нормализованных и натуральных обозначениях варьируемых факторов.

Таблица 1

Переменные факторы и уровни их варьирования

Наименование фактора	Кодовое обозначение	Нижний уровень	Основной уровень	Верхний уровень	Интервал варьирования
Содержание некондиционного сырья в совокупности со стружкой-отходом или лигнином, %/%	X_1	5/35	20/20	35/5	15/15
Содержание парафино-буроугольной эмульсии, масс. %	X_2	3	6	9	3
Продолжительность прессования, τ_1 , мин.	X_3	5	4,5	4	0,5

Таблица 2

Матрица планирования эксперимента при использовании некондиционного сырья в совокупности со стружкой-отходом в составе сырья

№ опыта	x_1		x_2		x_3		$Y_1, \sigma_{изг},$ МПа	$Y_2, \sigma_{\perp},$ МПа	Y_3, h за 24 ч., %
		%/%		масс. %		мин.			
1	-1	5/35	-1	3	-1	5	20,6	0,39	20
2	1	35/5	-1	3	-1	5	20,4	0,36	23
3	-1	5/35	1	9	-1	5	21,0	0,37	18
4	1	35/5	1	9	-1	5	20,8	0,34	21
5	-1	5/35	-1	3	1	4	20,5	0,4	19
6	1	35/5	-1	3	1	4	20,3	0,37	22
7	-1	5/35	1	9	1	4	20,9	0,39	17

Продолжение таблицы 2

8	1	35/5	1	9	1	4	20,7	0,36	20
9	-1	5/35	0	6	0	4,5	21,0	0,41	18
10	1	35/5	0	6	0	4,5	20,8	0,38	21
11	0	20/20	-1	3	0	4,5	20,4	0,4	20
12	0	20/20	1	9	0	4,5	20,8	0,38	18
13	0	20/20	0	6	-1	5	20,9	0,39	20
14	0	20/20	0	6	1	4	20,8	0,41	19

Таблица 3

Матрица планирования эксперимента при использовании некондиционного сырья в совокупности с гидролизным лигнином в составе сырья

№ опыта	x_1		x_2		x_3		$Y_1, \sigma_{изг},$ МПа	$Y_2, \sigma_{\perp},$ МПа	Y_3, h за 24 ч., %
		%%		масс. %		мин.			
1	-1	5/35	-1	3	-1	5	20,5	0,37	21
2	1	35/5	-1	3	-1	5	20,5	0,36	22
3	-1	5/35	1	9	-1	5	20,9	0,36	19
4	1	35/5	1	9	-1	5	20,9	0,35	21
5	-1	5/35	-1	3	1	4	20,4	0,39	20
6	1	35/5	-1	3	1	4	20,4	0,38	21
7	-1	5/35	1	9	1	4	20,8	0,37	18
8	1	35/5	1	9	1	4	20,8	0,36	20
9	-1	5/35	0	6	0	4,5	20,9	0,39	19
10	1	35/5	0	6	0	4,5	20,9	0,38	20
11	0	20/20	-1	3	0	4,5	20,4	0,4	20
12	0	20/20	1	9	0	4,5	20,8	0,38	18
13	0	20/20	0	6	-1	5	20,9	0,39	20
14	0	20/20	0	6	1	4	20,8	0,41	19

Математическое описание зависимости предела прочности ДСтП при статическом изгибе от варьируемых технологических параметров после оценки значимости коэффициентов регрессии и исключения незначимых представлено в виде нормализованных уравнений регрессии:

– в экспериментах с использованием некондиционного сырья в совокупности со стружкой-отходом от оцилиндровки круглых лесоматериалов:

$$Y_1 = 20,85 - 0,1X_1 + 0,2X_2 - 0,05X_3 + 0,054X_1^2 - 0,247X_2^2$$

– в экспериментах с использованием некондиционного сырья в совокупности с гидролизным лигнином:

$$Y_1 = 20,85 + 0,2X_2 - 0,05X_3 + 0,054X_1^2 - 0,247X_2^2$$

Математическое описание зависимости предела прочности ДСтП при растяжении перпендикулярно пласти от варьируемых технологических параметров после оценки

значимости коэффициентов регрессии, и исключения незначимых представлено в виде нормализованных уравнений регрессии:

– в экспериментах с использованием некондиционного сырья в совокупности со стружкой-отходом от оцилиндровки круглых лесоматериалов:

$$Y_2 = 0,406 - 0,015X_1 - 0,008X_2 + 0,008X_3 - 0,011X_1^2 - 0,016X_2^2 - 0,006X_3^2$$

– в экспериментах с использованием некондиционного сырья в совокупности с гидролизным лигнином:

$$Y_2 = 0,404 - 0,005X_1 - 0,008X_2 + 0,008X_3 - 0,02X_1^2 - 0,014X_2^2$$

Математическое описание зависимости разбухания ДСтП по толщине за 24 ч. от варьируемых технологических параметров после оценки значимости коэффициентов регрессии и исключения незначимых представлено в виде нормализованных уравнений регрессии:

– в экспериментах с использованием некон-

диционного сырья в совокупности со стружкой-отходом от оцилиндровки круглых лесоматериалов:

$$Y_3 = 19,0 + 1,5X_1 - X_2 - 0,5X_3 + 0,505X_1^2 + 0,505X_3^2$$

– в экспериментах с использованием некондиционного сырья в совокупности с гидролизным лигнином:

$$Y_3 = 18,88 + 0,7X_1 - 0,8X_2 - 0,5X_3 + 0,63X_1^2 + 0,63X_3^2$$

Зависимость прочности при статическом изгибе от содержания некондиционного сырья в совокупности со стружкой-отходом и содержания эмульсии в составе внутреннего слоя представлена на рис. 1, от содержания

некондиционного сырья в совокупности с гидролизным лигнином и содержания эмульсии в составе внутреннего слоя – на рис. 2. На рис. 1, 2 видно, что некондиционное сырье в совокупности со стружкой-отходом и лигнином практически не оказывает отрицательное воздействие на прочность древесностружечных плит при статическом изгибе. Содержание некондиционного сырья в любых соотношениях оставляет прочность ДСтП при статическом изгибе в пределах нормы для марки П-А по ГОСТ 10632-2007. Вместе с тем, введение парафино-буроугольной эмульсии во внутренний слой в количестве 6,0-7,0 масс.% способствует увеличению прочностных характеристик готовых плит.

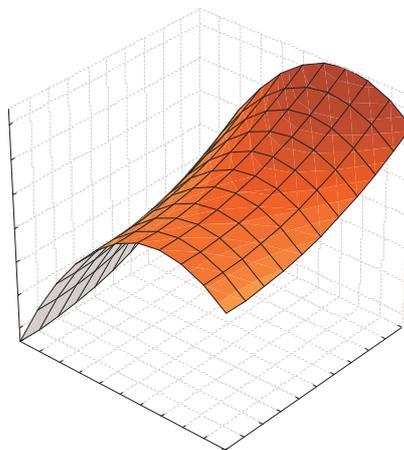


Рис. 1. Зависимость прочности ДСтП при статическом изгибе от содержания некондиционного сырья в совокупности со стружкой-отходом и эмульсии в составе внутреннего слоя.

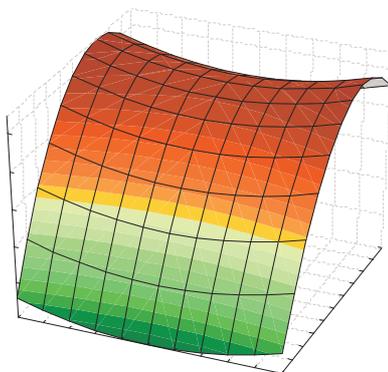


Рис. 2. Зависимость прочности ДСтП при статическом изгибе от содержания некондиционного сырья в совокупности с гидролизным лигнином и эмульсии в составе внутреннего слоя.

Зависимость прочности ДСтП при растяжении перпендикулярно пласти от содержания эмульсии во внутреннем слое и продолжительности прессования образцов с использованием некондиционного сырья в совокупности со стружкой-отходом представлена на рис. 3.

На рис. 3 видно, что максимальной прочностью при растяжении перпендикулярно пласти (0,41 МПа) обладают образцы с содержанием парафино-буроугольной эмульсии 6,0-7,0 масс.%, изготовленные при продолжительности прессования 4,1-4,4 мин. Рассматривая прочность ДСтП перпендикулярно пласти, можно увидеть, что вве-

дение парафино-буроугольной эмульсии во внутренний слой ДСтП действительно, как и предполагалось, дает положительный эффект компенсации низкого уровня рН сырьевого материала. При этом изготавливаемые образцы ДСтП уже при выдержке в прессе в течение 4 мин. имеют высокую прочность на разрыв перпендикулярно пласти.

Зависимость прочности ДСтП при растяжении перпендикулярно пласти от содержания некондиционного сырья в совокупности со стружкой-отходом и содержания эмульсии в составе внутреннего слоя представлена на рис. 4.

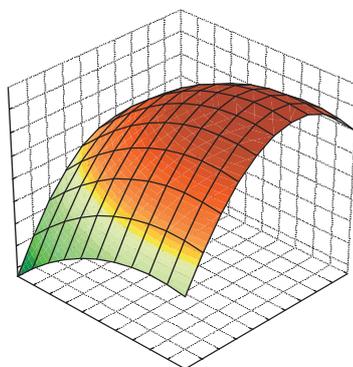


Рис. 3. Зависимость прочности ДСтП при растяжении перпендикулярно пласти от содержания эмульсии во внутреннем слое и продолжительности прессования.

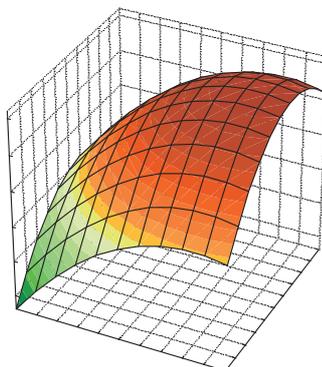


Рис. 4. Зависимость прочности ДСтП при растяжении перпендикулярно пласти от содержания некондиционного сырья в совокупности со стружкой-отходом и эмульсии в составе внутреннего слоя.

Из рис. 4 и 5 видно, что максимальной прочностью при растяжении перпендикулярно пласти (0,41; 0,405 МПа) обладают образцы с содержанием некондиционного сырья в совокупности со стружкой-отходом в составе внутреннего слоя в соотношении: 8/32 – 14/26, в совокупности с гидролизным лигнином 8/32 – 17/23 в составе внутренне-

го слоя и парафино-буроугольной эмульсии 4,8-6,6 масс. %.

Зависимость разбухания по толщине за 24 час. от содержания некондиционного сырья в совокупности с гидролизным лигнином в составе внутреннего слоя и продолжительности прессования представлена на рис. 6 .

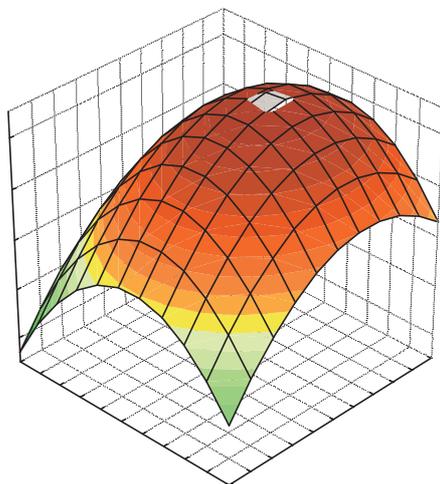


Рис. 5. Зависимость прочности при растяжении перпендикулярно пласти от содержания некондиционного сырья в совокупности с гидролизным лигнином и эмульсии в составе внутреннего слоя.

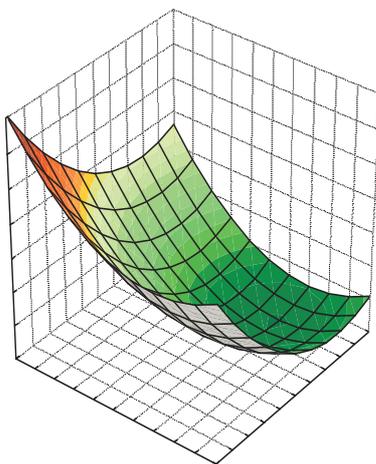


Рис. 6. Зависимость разбухания ДСтП по толщине за 24 часа от содержания некондиционного сырья в совокупности с гидролизным лигнином в составе внутреннего слоя и продолжительности прессования.

Согласно результатам, представленным на рис. 6, минимальное значение параметра разбухания по толщине за 24 час. (19 %) наблюдается у образцов с содержанием некондиционного сырья в совокупности с гидролизным лигнином в составе внутреннего слоя в соотношении 8/32-17/23 %/%, изготовленных при продолжительности прессования 4,4-4,2 мин.

В качестве показателей эффективности производства древесностружечных плит (табл. 6 и 7) выбраны: – прочность древесностружечных плит, испытанных на статический изгиб ($Y_1 \rightarrow \max$);

– прочность древесностружечных плит, испытанных на растяжение перпендикулярно пласти ($Y_2 \rightarrow \max$);

– разбухание древесностружечных плит по толщине после вымачивания их в течение 24 часов ($Y_3 \rightarrow \min$).

С целью установления величин параметров управления для обеспечения оптимальных значений показателей эффективности проведена однокритериальная оптимизация методом Ньютона [3] для каждого из выбранных показателей технологических свойств сырья и полученной клеевой композиции. Результаты решения однокритериальной оптимизационной задачи отражены в табл. 4 и 5.

Экстремумы целевых функций Y_j^* и соответствующие им значения исследуемых факторов X_{ij}^* , полученные в результате однокритериальной оптимизации, являются основой для определения координат «условного центра масс».

Результаты поликритериальной оптимизации приведены в табл. 6 и 7.

Таблица 4

Оптимальные значения исследуемых факторов и параметров оптимизации при использовании некондиционного сырья в совокупности со стружкой-отходом в производстве древесностружечных плит

Целевая функция	Решение задачи			Значения выходных параметров, отвечающих решению		
	X_1	X_2	X_3	Y_1	Y_2	Y_3
$Y_1 \rightarrow \max$	5/35	6	5	21,004	0,41	18,005
$Y_2 \rightarrow \max$	5/35	6	4	20,85	0,406	18
$Y_3 \rightarrow \min$	5/35	9	4,5	20,9	0,408	19

Таблица 5

Оптимальные значения исследуемых факторов и параметров оптимизации при использовании некондиционного сырья в совокупности с гидролизным лигнином в производстве древесностружечных плит

Целевая функция	Решение задачи			Значения выходных параметров, отвечающих решению		
	X_1	X_2	X_3	Y_1	Y_2	Y_3
$Y_1 \rightarrow \max$	35/5	6	5	20,904	0,404	18,81
$Y_2 \rightarrow \max$	20/20	6	4	20,85	0,404	18,08
$Y_3 \rightarrow \min$	5/35	9	4,5	20,9	0,412	18,88

Таблица 6

Результаты поликритериальной оптимизации при использовании некондиционного сырья в совокупности со стружкой-отходом

j	Условная масса m_j	Значения параметров управления			Оптимальные значения показателей эффективности Y_j^{**}
		X_1^{**}	X_2^{**}	X_3^{**}	
1	2,988	5,33/34,67	7,02	4,5	21,04
2	2,985				0,406
3	3,055				17,68

Таблица 7

Результаты поликритериальной оптимизации при использовании некондиционного сырья в совокупности с гидролизным лигнином

j	Условная масса m_j	Значения параметров управления			Оптимальные значения показателей эффективности Y_j^{**}
		X_1^{**}	X_2^{**}	X_3^{**}	
1	2,997	20,05/19,95	7,0	4,5	20,89
2	3,02				0,40
3	2,965				18,62

Таким образом, в результате поликритериальной оптимизации математических моделей методом условного центра масс получены оптимальные значения технологических параметров, обеспечивающих максимальные показатели физико-механических свойств ДСтП:

а) – при использовании некондиционно-го сырья в совокупности со стружкой-отходом:

– содержание некондиционного сырья в совокупности со стружкой-отходом – 5,33/34,67 %/%;

– содержание парафино-буроугольной эмульсии – 7,02 масс.ч.;

– продолжительность прессования – 4,5 мин.;

б) – при использовании некондиционно-го сырья в совокупности с гидролизным лигнином:

– содержание некондиционного сырья в совокупности с гидролизным лигнином – 20,05/19,95 %/%;

– содержание парафино-буроугольной эмульсии – 7 масс.ч.;

– продолжительность прессования – 4,5 мин.

Анализ полученных результатов позволяет сделать заключение, что прочность ДСтП при статическом изгибе при любом содержании некондиционного сырья в совокупности со стружкой-отходом и лигнином незначи-

тельно уменьшается, но при этом полностью соответствует марке П-А по ГОСТ 10632-2007 (норма 13,5 МПа). Максимальной прочностью при статическом изгибе обладают образцы, изготовленные при продолжительности прессования, близкой к используемой на предприятии ≈ 5 мин. (4,75 мин.). Вероятно, при этой продолжительности достигается максимальное сближение частиц наружных слоев на минимальные расстояния и, соответственно, их уплотнение, что большей частью определяет прочность ДСтП при статическом изгибе [4].

Согласно представленным зависимостям можно с уверенностью констатировать, что введение компенсаторов в виде стружки-отхода, лигнина и парафино-буроугольной эмульсии, модифицирующей связующее, обеспечит возможность получения ДСтП без изменения прочностных характеристик и позволит использовать в составе внутреннего слоя до 20 % некондиционного сырья (а при использовании некондиционного сырья в совокупности с гидролизным лигнином – до 25 %), что составляет ≈ 10 % в составе всей пресс-композиции.

Вместе с тем, максимальная прочность ДСтП при растяжении перпендикулярно пласти достигнута при продолжительности

прессования 4,0-4,25 мин. Очевидно, что повышенная кислотность некондиционного сырья в композиции с модифицированным связующим способствует интенсификации процесса прессования за счет ускорения процесса поликонденсации КФС, инициированного образованием новых функциональных реакционноспособных химических групп, увеличением поперечных связей, уплотнением полимерной сетки [5].

Показатель «разбухание по толщине за 24 час.» имеет минимальное значение при использовании некондиционного сырья в совокупности со стружкой-отходом – 10/30 %/%, однако марку П-А по ГОСТ 10632-2007 (норма до 20 %) ДСтП можно получать при использовании некондиционного сырья в совокупности со стружкой-отходом и гидролизным лигнином до 25/15 %/%, включительно. Минимальное разбухание плит за 24 часа также будут иметь образцы ДСтП, изготовленные при продолжительности прессования 4,0-4,25 мин.

Выводы.

1. В результате экспериментальных исследований подтверждены основные теоретические положения о возможности процесса изготовления плит из стружечно-клеевой композиции на основе некондиционного сырья. Установлено, что основными факторами, оказывающими влияние на показатели физико-механических свойств ДСтП, являются: содержание парафино-буроугольной эмульсии, продолжительность прессования.

2. На основании комплексной оценки влияния технологических параметров на физико-механические свойства плит получены оптимальные рецептуры стружечно-клеевых композиций.

3. Получены уравнения регрессии, адекватно описывающие влияние исследуемых технологических факторов на механические и физические характеристики древесностружечных плит.

4. Использование предлагаемых стружечно-клеевых композиций обеспечит получение ДСтП с улучшенными показателями физико-механических свойств.

5. Получены оптимальные параметры режимов прессования древесностружечных плит на основе использования некондиционного сырья в производстве древесностружечных плит.

Литература

Пижурич А.А., Розенблит М.С. Исследования процессов деревообработки. М.: Лесная промышленность, 1984. 232 с.

2. Плотникова Г.П., Денисов С.В., Челышева И.Н. Повышение эффективности древесностружечных плит // Вестн. КрасГАУ. 2010. Вып.7. С.152-158

3. Плотников Н.П., Денисов С.В. Оптимизация технологических режимов склеивания фанеры модифицированными клеевыми композициями // Там же. Вып. 5. С. 143-148.

4. Плотникова Г.П., Денисов С.В. Оптимизация технологических параметров в производстве древесностружечных плит на основе маломольных карбаминоформальдегидных смол с использованием стружки из отходов некондиционной древесины // Там же. Вып. 8. С.10-14.

5. Плотников Н.П., Симикова А.А. Снижение токсичности карбаминоформальдегидных смол // Там же. Вып. 6. С.155-158.