



УДК 674.815-41.001 (430.2)

© *В. П. Тищенко, С. П. Исаев, В. Е. Цветков, Ю. В. Пасько, А. И. Родионов, 2008*

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ ФОРМИРОВАНИЯ ДРЕВЕСНЫХ ПЛИТ НА ЭМИССИЮ ФОРМАЛЬДЕГИДА

Тищенко В. П. – канд. техн. наук, доц. кафедры «Экология и безопасность жизнедеятельности»; *Исаев С. П.* – канд. техн. наук, доц. кафедры «Технология деревообработки»; *Цветков В. Е.* – д-р. техн. наук, проф. завкафедрой «Технология древесных плит и пластиков» (МГУЛ); *Пасько Ю. В.* – канд. техн. наук, доц. кафедры «Технология древесных плит и пластиков» (МГУЛ); *Родионов А. И.* – канд. техн. наук, доц. кафедры «Машиноведение» (МГПУ)

Приведены результаты исследования влияния основных технологических факторов формирования древесностружечных плит на эмиссию формальдегида. Выявлены определяющие факторы и определены оптимальные параметры режима прессования при изготовлении древесностружечных плит.

The article deals with the investigation results on the influence of major technological factors in the process of shaping flakeboards on formaldehyde emission. The leading factors are found and the optimum parameters in the fabrication of flakeboards are determined.

Плитные древесные композиционные материалы (древесностружечные, древесноволокнистые и другие виды плит), изготавливаемые из низкокачественной древесины, отходов лесозаготовок и деревообрабатывающих производств успешно конкурируют с традиционными конструкционными материалами в различных отраслях промышленности.

Если в условиях рыночной экономики вопрос об улучшении физико-механических показателей остро не стоит, так как по этим показателям выпускаемые древесностружечные плиты (ДСтП) удовлетворяют большую часть потребителей, то в связи с резко ухудшающейся экологической обстановкой важнейшим качественным показателем

стала величина эмиссии формальдегида и его содержание в плитах.

Это объясняется тем, что сочетанное воздействие повышенной температуры, вредных веществ, вибрации, шума и концентраций формальдегида даже в пределах ощущения запаха ($0,06-0,11 \text{ мг/м}^3$) вызывает ухудшение эмоционального состояния, снижение общей иммунологической реактивности организма человека и, как следствие, повышение общего уровня заболеваемости и снижение работоспособности. Воздействие высоких концентраций формальдегида может вызвать повреждение дыхательных путей и легких, слизистых тканей желудочно-кишечного тракта, спровоцировать приступы астмы и развитие онкологических заболеваний, в частности решетчатой кости носовой полости, и даже мутации потомства отравившихся (данные Международного агентства по исследованию рака).

Управление эмиссией формальдегида – сложная задача, решение которой требует интегрального изучения всех стадий процесса производства, начиная от подготовки сырья и материалов до эксплуатации готовой продукции. При этом необходимо учитывать не только желаемое качество плит, имеющееся оборудование и мощности, затраты на производство плит, но и огромные штрафные санкции за выброс в атмосферу вредных веществ и компенсации за вредные условия труда. Возможность решения рассматриваемой задачи усложняется недостаточной изученностью изменений, происходящих в исходных компонентах и готовых плитах в результате физико-химических, термодинамических и других процессов, что не позволяет дать им количественную оценку на основе теоретических положений и проанализировать влияние различных факторов на эмиссию формальдегида на всех этапах жизненного цикла ДСтП.

Одним из выходов в сложившейся ситуации является установление причин и источников выделения формальдегида в процессе производства древесностружечных плит и поиск вариантов технологий создания материалов, которые бы имели достаточную "степень чистоты" в гигиеническом аспекте понимания этого термина.

В частности, в работе [1] для анализа условий формирования экологической безопасности ДСтП использовали структурную схему Исискава, которая позволила в простой и наглядной форме осуществить декомпозицию этой сложной системы на восемь подсистем и с учетом вышеотмеченных требований выразить в обобщенном виде целевую функцию минимизации эмиссии формальдегида в процессе производства:

$$F = C \cdot [f(q_i) + f(b_j) + f(p_k) + f(s_l) + f(h_n) + f(w_m) + f(d_r)] \rightarrow \min, (1)$$

где C – коэффициент, учитывающий штрафные санкции за выбросы в атмосферу вредных веществ, компенсации за вредные условия труда и



т. п.; $f(q_i)$ – функция, отражающая зависимость эмиссии формальдегида от качественных параметров древесных частиц, $i = \overline{(1; I)}$; $f(b_j)$ – функция, отражающая зависимость эмиссии формальдегида от характеристик связующего, $j = \overline{(1; J)}$; $f(p_k)$ – функция, отражающая зависимость эмиссии формальдегида от физико-механических свойств плит, $k = \overline{(1; K)}$; $f(s_l)$ – функция, отражающая зависимость количества выделяемого формальдегида от параметров прессования ДСтП, $l = \overline{(1; L)}$; $f(h_n)$ – функция, отражающая зависимость количества выделяемого формальдегида от технологических особенностей оборудования, $n = \overline{(1; N)}$; $f(w_m)$ – функция, отражающая зависимость эмиссии формальдегида от технологической дисциплины работников, $m = \overline{(1; M)}$; $f(d_r)$ – функция, отражающая зависимость эмиссии формальдегида от характеристик уровня материально-технической базы, $r = \overline{(1; R)}$.

Поскольку принятая целевая функция (1) задачи минимизации выделения формальдегида является обобщенной, то предлагается ее разбиение на несколько локальных моделей с использованием математических методов планирования экспериментов, для построения которых необходимо определить факторы, оказывающие наибольшее влияние на исследуемый процесс.

Для этого из большого количества факторов, указанных на структурной схеме специалистами (группой анализа), было отобрано 18 факторов (табл. 1), оказывающих влияние на эмиссию формальдегида в процессе прессования плит. Затем экспертам было предложено проанжировать их по степени влияния.

В табл. 2 приведена матрица рангов, полученная из анкет в результате опроса 10 экспертов по выявлению факторов, оказывающих наибольшее влияние на величину выделений формальдегида в процессе производства древесностружечных плит.

В табл. 3 приведена матрица переформированных рангов и результаты, необходимые для расчета коэффициента конкордации W . Согласованность мнений экспертов при ранжировании факторов по степени влияния на величину выделений формальдегида в процессе прессования плит определяли с помощью коэффициента конкордации, который при наличии связанных рангов вычисляем по формуле:

$$W = \frac{12S^2}{m^2 \cdot (n^3 - n) - m \cdot \sum_{i=1}^m T_{ji}} = \frac{12 \cdot 44636,5}{100(324 - 18) - 10 \cdot 27,5} = 0,919 \quad (2)$$

$$\text{где } S^2 = \sum_{j=1}^n \left(\sum_{i=1}^m a_{ij} - d \right)^2 = 44636,5;$$



$$\sum_{i=1}^m T_{ij} = \sum_{j=1}^n (t_j^3 - t_j) = 27,5,$$

где t_{ji} – число связанных рангов (число повторений j -го ранга у i -го эксперта); m – количество экспертов; n – количество ранжируемых факторов.

Таблица 1

Факторы, определяющие величину эмиссии формальдегида в процессе прессования ДСтП

Наименование фактора	Ранг фактора
1. Вид связующего	
2. Содержание свободного формальдегида, %	
3. Расход связующего, в % к абсолютно сухой стружке	
4. Содержание сухих веществ в связующем, %	
5. Вид отвердителя	
6. Расход отвердителя в % к сухой смоле	
7. Порода древесины	
8. Фракционный состав и размеры стружки	
9. Влажность сухих стружек, %	
10. Температура прессования, °С	
11. Продолжительность прессования, мин/мм	
12. Давление прессования, МПа	
13. Конструкция плиты, (количество слоев)	
14. Соотношение слоев плиты, %	
15. Плотность плиты, кг/м ³	
16. Плохая герметизация оборудования	
17. Плохая работа вентиляции	
18. Нарушение технологии производства плит	

Таблица 2

Результаты очного и заочного анкетного опроса

Экспер-ты	Факторы																	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	1	2	5	7	4	6	9	9	4	2	3	8	13	13	8	11	12	10
2	1	2	4	6	7	5	8	9	5	3	3	10	10	11	11	13	14	12
3	2	1	6	9	5	8	7	7	4	4	3	9	14	15	10	12	13	11
4	2	1	5	8	6	4	9	9	4	3	3	7	12	12	13	10	10	11
5	2	2	3	6	4	4	5	5	3	1	1	8	12	12	7	9	10	11
6	1	2	4	4	6	5	6	7	3	1	3	8	12	13	10	10	11	9
7	1	1	5	5	4	6	7	7	3	2	2	8	12	12	9	10	11	9
8	1	1	3	3	6	7	5	6	4	1	2	8	11	11	8	8	9	10
9	1	2	5	7	7	6	8	10	4	1	3	9	14	14	10	11	12	13
10	2	2	4	5	7	7	8	5	3	1	3	6	12	12	9	10	10	11



Таблица 3

**Матрица переформированных рангов и результаты обработки
данных**

Факторы <i>n</i>	Эксперты <i>m</i>										$\sum_{i=1}^m a_{ij}$	$\sum_{i=1}^m a_i - d$	$\left(\sum_{i=1}^m a_{ij} - d\right)^2$
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10			
1	1	1	2	2	3,5	1,5	1,5	2	1,5	2,5	18,5	76,5	5825,25
2	2,5	2	1	1	3,5	3	1,5	2	3	2,5	22	73	5329
3	7	5	7	7	5,5	6,5	7,5	5,5	6	6	63	32	1024
4	9	8	11,5	10	11	6,5	7,5	5,5	8,5	7,5	85	10	100
5	5,5	9	6	8	7,5	9,5	6	9,5	8,5	10,5	80	15	225
6	8	6,5	10	5,5	7,5	8	9	11	7	10,5	83	12	144
7	12,5	10	8,5	11,5	9,5	9,5	10,5	8	10	12	102	7	49
8	12,5	11	8,5	11,5	9,5	11	10,5	9,5	12,5	7,5	104	9	81
9	5,5	6,5	4,5	5,5	5,5	4,5	5	7	5	4,5	53,5	41,5	1722,25
10	2,5	3,5	4,5	3,5	1,5	1,5	3,5	2	1,5	1	25	70	4900
11	4	3,5	3	3,5	1,5	4,5	3,5	4	4	4,5	36	59	3481
12	10,5	12,5	11,5	9	13	12	12	13	11	9	113,5	18,5	342,25
13	17,5	12,5	17	16,5	17,5	17	17,5	16,5	17,5	17,5	167	72	5184
14	17,5	14,5	18	16,5	17,5	18	17,5	16,5	17,5	17,5	171	76	5776
15	10,5	14,5	13	18	12	14,5	13,5	13	12,5	13	134,5	39,5	1560,25
16	15	17	15	13,5	14	14,5	15	13	14	14,5	145,5	50,5	2530,25
17	16	18	16	13,5	15	16	16	14	15	14,5	154	59	3481
18	14	16	14	15	16	13	13,5	15	16	16	148,5	53,5	2862,25
$\sum_{j=1}^n a_j$	171	171	171	171	171	171	171	171	171	171	$S^2 = \sum_{j=1}^n \left(\sum_{i=1}^m a_i - d\right)^2$		
$\sum_{j=1}^n T_j$	2,5	2,0	1,5	2,5	3,0	2,5	3,0	5,5	2,0	3,0	44636,5		

Значимость коэффициента конкордации проверили по критерию Пирсона χ^2 при числе степеней свободы $f = n - 1 = 18 - 1 = 17$ и уровне значимости $q = 0,01$:

$$\chi_{рас}^2 = m \cdot (n - 1) \cdot W = 10 \cdot (18 - 1) \cdot 0,919 = 156,23.$$

Гипотеза о наличии согласия во мнениях экспертов принимается, так как $\chi_{рас}^2 = 156,23 > \chi_{кр}^2 = 33,409$.

Таким образом, наибольшее влияние на эмиссию формальдегида из ДСтП в процессе прессования оказывают вид связующего и содер-



жание свободного формальдегида в нем, температура и продолжительность прессования, влажность сухих частиц и расход связующего. Факторы перечислены в порядке уменьшения степени влияния.

Как отмечалось выше, в решении производственных и социальных проблем в производстве ДСтП особенно остро стоит вопрос защиты окружающей среды и здоровья населения.

Данную проблему можно решить двумя путями: первый – отработка параметров технологического процесса производства, обеспечивающего выпуск ДСтП класса Е-1, второй – снижение содержания свободного формальдегида в карбамидоформальдегидных олигомерах (КФО).

Ранее проведенные исследования [2-4] по изучению процесса синтеза КФО, модифицируемых отходами спиртового производства (сивушные спирты), содержащих бутанол, ацетон, изопропил, изобутанол и другие показали, что введение от 1 до 10 % отходов спиртового производства позволяет получать КФО с содержанием формальдегида менее 0,15 % и выделением свободного формальдегида из плит, изготовленных на основе синтезированных олигомеров, менее 10 мг/м².

Поэтому для изучения возможности получения ДСтП, удовлетворяющих всем показателям плит класса П-А, было проведено исследование влияния температуры и продолжительности прессования, а также расхода связующего, свойства которого приведены в табл. 4.

Таблица 4

Свойства полученной смолы

Вязкость по ВЗ-4, с	60 ... 75
РН	7,0
Показатель преломления	1,477 ... 1,482
Желатинизация при 100 °С, с	70 ... 85
Содержание свободного формальдегида, мг/л	0,15

В качестве выходных параметров приняли предел прочности на изгиб $Y_{\sigma_{и}}$, растяжение перпендикулярно пласти $Y_{\sigma_{\perp}}$, разбухание $Y_{\Delta h_{(100 \times 100)}}$ и выделение формальдегида из готовых плит Y_{CH_2O} . Ранее проведенными исследованиями установили, что зависимость критериев качества плит от расхода связующего, температуры и продолжительности прессования описывается уравнением 2-го порядка.

Поэтому для исследования влияния вышеперечисленных факторов на выходные параметры было решено воспользоваться планом второго порядка, отвечающего Д-оптимальности типа Бокса-Бенкина. В табл. 5 приведены уровни варьирования факторов.



Таблица 5

Уровни варьирования факторов

Наименование фактора	Обозначение фактора		Уровни фактора		
	кодиро- ванное	нату- раль- ное	верх- ний (+)	основ- ной (0)	ниж- ний (-)
Температура плит пресса, °С	<i>T</i>	X ₁	190	170	150
Расход связующего, %	<i>P</i>	X ₂	14	12	10
Продолжительность прессования, мин/мм	<i>τ</i>	X ₃	0,5	0,4	0,3

Обработав экспериментальные данные по существующей методике [5, 6], получили математическое описание исследуемого процесса. Оно представлено уравнениями регрессии (6-9) в натуральном обозначении переменных факторов:

$$\bar{Y}_{\sigma_{\perp}} = -6,17925 + 0,06095T + 0,1495P + 0,135\tau - 0,000193T^2 - 0,00675P^2 - 5,2\tau^2 + 0,0125T\tau \quad ; \quad (6)$$

$$\bar{Y}_{\Delta h(100 \times 100)} = 96,013 - 1,63895T + 6,67375P + 175,095\tau + 0,004825T^2 - 0,49025P^2 - 117,3\tau^2 + 0,018975TP - 0,4015T\tau \quad ; \quad (7)$$

$$\bar{Y}_{\sigma_u} = -183,152 + 2,27385T + 0,811P - 11,05\tau - 0,006533T^2 \quad ; \quad (8)$$

$$\bar{Y}_{CH_{2O}} = 142,504 + 0,228T - 62,88\tau - 22,1922P - 0,00236T^2 + 0,54525P^2 + 0,045625TP + 3,375P\tau \quad , \quad (9)$$

где *T* – температура плит пресса, °С; *P* – расход связующего, %; *τ* – продолжительность прессования, мин/ мм.

Полученные уравнения регрессии адекватно описывают влияние технологических факторов на свойства ДСтП и позволяют не только определить значения этих параметров в области экспериментальных исследований, но и дают возможность решить соответствующие задачи оптимизации. Очевидно, что рациональные режимы прессования должны обеспечить максимальную прочность плит при минимально возможном разбухании и выделениях формальдегида из готовых плит.

Для решения рассматриваемой многокритериальной задачи принята оптимизация по методу Соболя-Статникова [7-9]. В данном случае задача оптимизации сформулирована следующим образом: необходимо найти такие значения переменных факторов, которые обеспечивают максимальную прочность при минимальном разбухании и выделении формальдегида из готовых плит, а также соблюдении параметрических ограничений.

Фиксированные параметры: плотность плиты $\rho_{пл} = 700 \text{ кг/м}^3$;
влажность сухой стружки $W_{c.сmp.} = 2 \pm 1 \%$.

Параметрические ограничения:

$$\begin{aligned} 150 &\leq T \leq 190, \text{ } ^\circ\text{C}, \\ 10 &\leq P \leq 14, \text{ } \%, \\ 0,3 &\leq \tau \leq 0,5, \text{ мин/мм плиты.} \end{aligned}$$

Критерии качества:

$$\begin{aligned} \Phi_{\sigma_{\perp}} = &-6,17925 + 0,06095T + 0,1495P + 0,135\tau - 0,000193T^2 - \\ &- 0,00675P^2 - 5,2\tau^2 + 0,0125T\tau \end{aligned} \quad ; \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \Phi_{\Delta h(100 \times 100)} = &96,013 - 1,63895T + 6,67375P + 175,095\tau + 0,004825T^2 - \\ &- 0,49025P^2 - 117,3\tau^2 + 0,018975TP - 0,4015T\tau \end{aligned} \quad ; \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \Phi_{CH_2O} = &142,504 + 0,228T - 62,88\tau - 22,1922P - 0,00236T^2 + \\ &+ 0,54525P^2 + 0,045625TP + 3,375P\tau \end{aligned} \quad ; \quad (12)$$

$$\Phi_{\sigma_u} = -183,152 + 2,27385T + 0,811P - 11,05\tau - 0,006533T^2. \quad (13)$$

Ограничения критериев качества первоначально выберем в достаточном широком диапазоне:

$$\begin{aligned} \Phi_{\sigma_u} &\geq 17,0, \text{ МПа,} \\ \Phi_{\sigma_{\perp}} &\geq 0,3, \text{ МПа,} \\ \Phi_{\Delta h(100 \times 100)} &\leq 20 \%, \\ \Phi_{CH_2O} &\leq 10 \text{ мг/100 г а.с. плиты.} \end{aligned}$$

Дальнейший расчет выполнен на ЭВМ с использованием пакета программ многокритериальной оптимизации ОРТИМУМ [13] при числе расчетных точек $M = 1000$. В результате расчетов в точке $M = (0466)$ получены следующие параметры прессования ДСтП: $T = 168,94$, $^\circ\text{C}$, $P = 13,9$, $\%$, $\tau = 0,46$ мин/мм толщины плиты. При этих параметрах были получены наилучшие значения показателей качества:

$$\begin{aligned} \Phi_{\sigma_u} = &20,789, \text{ МПа; } \Phi_{\sigma_{\perp}} = 0,474, \text{ МПа; } \Phi_{\Delta h(100 \times 100)} = 19,137 \%; \\ \Phi_{CH_2O} = &6,26 \text{ мг/100 г а.с. плиты.} \end{aligned}$$



Опытные образцы плиты, изготовленные по этому режиму, имели следующие показатели качества:

$$\begin{aligned} \Phi_{\sigma_{\parallel}} &= 18,5, \text{ МПа}; \Phi_{\sigma_{\perp}} = 0,4, \text{ МПа}; \Phi_{\Delta h(100 \times 100)} = 20,7 \text{ \%}; \\ \Phi_{\text{CH}_2\text{O}} &= 6,13 \text{ мг/100 г а.с. плиты.} \end{aligned}$$

Таким образом, управление технологическими факторами, в конечном счете, определяет эффективность производственного процесса, однако, без учета степени воздействия промышленных выбросов на окружающую среду.

Поэтому в качестве критерия оптимизации логично принять обобщенный показатель, который бы отражал не только количество выделяющегося формальдегида, но и затраты предприятия, связанные с нарушением санитарно-экологических норм.

С учетом всех этих требований целевую функцию F можно записать следующим образом:

$$F = f(C) \cdot f(r_k) \rightarrow \min, \quad (14)$$

где $f(r_k)$ – функция зависимости выделения формальдегида от параметров горячего прессования, $k = 1; 4$, соответственно: 1 – содержание свободного формальдегида в связующем; 2 – расход связующего; 3 – температура прессования; 4 – продолжительность прессования;

$f(C)$ – функция, описывающая интегральный коэффициент, учитывающий штрафные санкции за выбросы в атмосферу вредных и опасных веществ, компенсации за вредные условия труда.

Влияние технологических факторов на эмиссию формальдегида следует рассматривать в качестве составной части комплекса критериев оценки производства древесностружечных плит и поиска вариантов технологий создания материалов с учетом их экологической безопасности.

Библиографические ссылки

1. Шамрова И.С., Тищенко В.П. Построение целевой функции задачи минимизации выделения формальдегида из древесностружечных плит в процессе производства // Проблемы безопасности и совершенствования учебного процесса. Хабаровск, 2001.
2. Снижение токсичности древесных плитных материалов. / В. Е. Цветков, Т. Н. Карпова, Ю. В. Пасько, М. В. Кохреидзе // Материалы Всероссийской научно-технической конференции. М., 1994.



3. Пасько Ю. В., Цветков В. Е., Мельникова Л. В. Свойства карбамидо-формальдегидных смол, модифицированных смесью одноатомных спиртов // Научн. тр. Вып. 277. М., 1995.
4. Пасько Ю. В. Физико-химические свойства КФ-смолы, модифицированной фракциями спиртового производства // Научн. тр. Вып. 312. М., 2000.
5. Пижурин А. А. Современные методы исследований технологических процессов в деревообработке. М., 1972.
6. Вознесенский В. А. Статистические методы планирования эксперимента в технико-экономических исследованиях. М., 1974.
7. Соболев И. М., Статников Р. Б. Выбор оптимальных параметров в задачах со многими критериями. М., 1981.
8. Керимов З. Г., Багиров С. А. Автоматизированное проектирование конструкций. М., 1985.
9. Шимкович Д. Г. Пакет программ многокритериального оптимального проектирования лесозаготовительных машин и механизмов // Научн. тр. М., 1994.