**ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ**
№ 1 ЛЕСНОЙ ЖУРНАЛ 1999

# МЕХАНИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ДРЕВЕСИНЫ И ДРЕВЕСИНОВЕДЕНИЕ

УДК 674.093.26

*В.Е. ВОСКРЕСЕНСКИЙ*

С.-Петербургская лесотехническая академия

Воскресенский Владимир Евгеньевич родился в 1938 г., окончил в 1960 г. Ленинградскую лесотехническую академию, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой теории механизмов, деталей машин и подъемно-транспортных устройств С.-Петербургской лесотехнической академии, академик МАНЕБ. Имеет около 120 печатных работ в области исследования и разработки новых технологий и нестандартного оборудования в фанерной и деревообрабатывающей промышленности.

## ОПТИМАЛЬНЫЕ РЕЖИМЫ ОТДЕЛЕНИЯ ЛУБА ОТ БЕРЕСТЫ

Обоснованы оптимальные режимы отделения луба от бересты фрезерованием в отходах окорки фанерного сырья; представлена матрица планирования эксперимента и результаты ее реализации; получено уравнение регрессии в виде математико-статистической квадратичной модели, которая представлена в натуральных переменных.

The optimum modes of bast and bark separation are substantiated in the process of milling of barking wastes of veneer raw material. The matrix of experiment planning and the results of its realization are presented. The regression equation is developed in a form of mathematical-and-statistical quadratic model, presented in natural variables.

В технологической схеме разделения отходов окорки березового фанерного сырья на луб и бересту важное место отводится качеству отделения луба от бересты методом фрезерования [3]. За критерий качества была принята массовая доля луба $Л_{н1}$ в виде неотделившегося от бересты слоя [2]:

$$Л_{н1} = \frac{100}{\dfrac{M_w^{б}\left(100+W_{а}^{л}\right)}{M_w^{л}\left(100+W_{а}^{б}\right)}+1} \le \left[Л_{н1}\right],$$

где $M_w^{б}$, $M_w^{л}$ – масса бересты и неотделившегося слоя луба при естественной влажности, г;

$W_{а}^{б}$, $W_{а}^{л}$ – абсолютная влажность бересты и луба, %;

$[Л_{н1}] = 1,5$ – допускаемая для первого сорта бересты массовая доля луба в виде неотделившегося от бересты слоя на этапе фрезерования, %.

В настоящей статье решается задача разработки оптимального режима отделения луба от бересты методом фрезерования, позволяющего получить минимальное значение критерия качества.

Оптимизацию проводили с применением математической теории планирования эксперимента по методу Бокса–Уилсона [1]. Варьируемые факторы: $x_1$ – отношение линейной скорости подающего ротора к линейной скорости фрезерующего ротора $v_2/v_1$; $x_2$ – отношение рабочего зазора между вершинами ножей отделяющих роторов к толщине бересты $\Delta p$ / $S_б$; $x_3$ – линейная скорость подающего ротора $v_2$, м/с.

Все остальные факторы зафиксированы на уровнях, обусловленных технологическими и экономическими соображениями. Рабочая фракция коры (РФК), полученная из отходов окорки березового фанерного сырья, имела размеры 50×20×10 мм. Толщина бересты $S_б$ = 2 мм, абсолютная влажность бересты $W_{а}^{б}$ = 39 % и луба $W_{а}^{л}$ = 100 %. Луб отделяли от бересты на экспериментальной установке, в которой ножи-зубья фрезерующего колеса имели следующие характеристики: передний угол $\gamma = -30^{\circ}$, угол заточки $\beta = 30^{\circ}$, шаг расположения $t$ = 10 мм , сквозные просветы между собой. Рабочая поверхность подающего колеса выполнена в виде чередующихся прямоугольных выступов (ширина 3 мм) и впадин (ширина 5 мм и глубина 1 мм), расположенных параллельно оси колеса.

Условия проведения эксперимента представлены в табл. 1. Каждый эксперимент повторяли три раза.

Для представленного плана ротатабельного композиционного планирования 2-го порядка уравнение регрессии принято в виде

$$\hat{Y}_1 = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_3X_3 + b_{12}X_1X_2 + b_{13}X_1X_3 + \\ + b_{23}X_2X_3 + b_{11}X_1^2 + b_{22}X_2^2 + b_{33}X_3^2, \quad (1)$$

где $\hat{Y}_1$ – значения оптимизирующего параметра;

$X_1$, $X_2$, $X_3$ – условные обозначения факторов.

Полная матрица планирования эксперимента и результаты ее реализации приведены в табл. 2.

Таблица 1

| Уровни α | Варьируемые факторы | | |
|---|---|---|---|
| | $x_1$ | $x_2$ | $x_3$ |
| -1,682 | 0,086 | 0,33 | 0,407 |
| -1 | 0,12 | 0,5 | 0,55 |
| 0 | 0,17 | 0,75 | 0,76 |
| +1 | 0,22 | 1,0 | 0,97 |
| +1,682 | 0,254 | 1,17 | 1,113 |

По критерию Кохрена $G$ была проведена проверка однородности дисперсий опытов:

$$G_{\text{расч}} = \frac{\max S_i^2}{\sum\limits_{i=1}^{N} S_i^2},$$

где $S_i^2$ – дисперсии по каждой серии дублированных опытов,

Таблица 2

| Порядковый номер опыта | $X_1$ | $X_2$ | $X_3$ | $\overline{Y_1}$ | $\hat{Y}_1$ | $П$, % |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | –1 | –1 | –1 | 1,82 | 1,873 | 2,91 |
| 2 | +1 | –1 | –1 | 3,20 | 3,257 | 1,78 |
| 3 | -1 | +1 | –1 | 2,45 | 2,521 | 2,89 |
| 4 | +1 | +1 | –1 | 3,80 | 3,873 | 1,92 |
| 5 | –1 | –1 | +1 | 1,50 | 1,547 | 3,13 |
| 6 | +1 | –1 | +1 | 2,95 | 3,003 | 1,79 |
| 7 | –1 | +1 | +1 | 2,10 | 2,163 | 3,00 |
| 8 | +1 | +1 | +1 | 3,52 | 3,587 | 1,90 |
| 9 | -1,682 | 0 | 0 | 1,73 | 1,645 | –4,91 |
| 10 | +1,682 | 0 | 0 | 4,10 | 4,009 | –2,22 |
| 11 | 0 | –1,682 | 0 | 2,22 | 2,155 | –2,93 |
| 12 | 0 | +1,682 | 0 | 3,30 | 3,191 | –3,30 |
| 13 | 0 | 0 | –1,682 | 3,05 | 2,956 | –3,08 |
| 14 | 0 | 0 | +1,682 | 2,52 | 2,442 | –3,09 |
| 15 | 0 | 0 | 0 | 2,80 | 2,826 | 0,93 |
| 16 | 0 | 0 | 0 | 2,85 | 2,826 | –0,84 |
| 17 | 0 | 0 | 0 | 2,75 | 2,826 | 2,76 |
| 18 | 0 | 0 | 0 | 2,90 | 2,826 | –2,55 |
| 19 | 0 | 0 | 0 | 2,78 | 2,826 | 1,65 |
| 20 | 0 | 0 | 0 | 2,87 | 2,826 | –1,52 |

Примечание. $\overline{Y_1}$ – среднее значение параметра по трем экспериментам; $\overline{Y_1}$ – значение параметра, полученное из математической модели (1); $П$ – процент отклонения модельных значений $\hat{Y}_1$ от экспериментальных $\overline{Y_1}$.

$$S_i^2 = \frac{1}{f}\sum_{u=1}^{n}\left(Y_{iu} - \overline{Y_i}\right)^2 = \frac{\left[\sum_{n=1}^{3}(Y_{iu} - Y_i)^2\right]}{2};$$

$f$ – число степеней свободы каждого опыта, $f = n - 1 = 2$;

$Y_{iu}$ – значение отклика в $u$-м дублированном опыте $i$-й серии, $u = 1, 2, 3$; $i = 1, 2, 3, ..., 20$;

$N$ – число опытов, $N = 20$;

$\max S_i^2 = S_7^2 = S_{10}^2 = 0{,}0325$.

При подстановке получаем

$$G_{\text{расч}} = \frac{0{,}0325}{0{,}3354} = 0{,}097.$$

Из распределения Кохрена [1] (для $p = 0{,}05$, $n = 20$, $f = n - 1 = 2$, где $p$ – 5 %-й уровень значимости, $n$ – число опытов) находим $G_{\text{табл}}$:

$$G_{1-p}(f, n) = G_{0{,}95}(2, 20) = 0{,}2705.$$

Полученное соотношение $G_{\text{расч}} < G_{\text{табл}}$ позволяет принять гипотезу об однородности дисперсий опытов.

Коэффициенты уравнения регрессии определяли по следующим формулам:

$$b_0 = a_1\sum_{i=1}^{N}\overline{Y_i} - a_2\sum_{j=1}^{k}\sum_{i=1}^{N}x_{ji}^2\overline{Y_i};$$

$$b_j = a_3\sum_{i=1}^{N}x_{ji}\overline{Y_i}; \quad j = 1, 2, \ldots, k;$$

$$b_{jl} = a_4\sum_{i=1}^{N}\left(x_{ji}x_{li}\right)\overline{Y_i}; \quad j,l = 1, 2,\ldots, k;$$

$$b_{jj} = a_5\sum_{i=1}^{N}x_{ji}^2\overline{Y_i} + a_6\sum_{j=1}^{k}\sum_{i=1}^{N}x_{ji}^2\overline{Y_i} - a_7\sum_{i=1}^{N}\overline{Y_i},$$

где $N$ – общее число экспериментов, $N = 20$;

$k = 3$ – число факторов;

$i$ – номер эксперимента;

$j$ – номер фактора.

Коэффициенты $a_1 = 0{,}1663$, $a_2 = 0{,}0568$, $a_3 = 0{,}0732$, $a_4 = 0{,}1250$, $a_5 = 0{,}0625$, $a_6 = 0{,}0069$, $a_7 = 0{,}0568$. Число экспериментов в центре плана $n_0 = 6$.

Коэффициенты $b_0 = 2{,}826$, $b_1 = 0{,}702$, $b_2 = 0{,}308$, $b_3 = -0{,}153$, $b_{12} = -0{,}008$, $b_{23} = -0{,}008$, $b_{13} = 0{,}018$, $b_{11} = 0{,}001$, $b_{22} = -0{,}054$, $b_{33} = -0{,}045$.

Значимость коэффициентов уравнения регрессии определяли с помощью критерия Стьюдента $t_p(f)$ (где $p$ – уровень значимости, $p = 0{,}05$, $f = n_0 - 1 = 5$ – число степеней свободы). В данном случае табличное значение критерия Стьюдента $t_{0,05}$ (5)= 2,57 [1]. Расчетные значения критерия Стьюдента определяли по формулам

$$t_0 = \frac{b_0}{S^2\left(b_0\right)}\ ;\quad t_j = \frac{b_j}{S^2\left(b_j\right)}\ ;\quad t_{jl} = \frac{b_{jl}}{S^2\left(b_{jl}\right)}\ ;\quad t_{jj} = \frac{b_{jj}}{S^2\left(b_{jj}\right)}\ ,$$

где $S^2(b_0)$, $S^2(b_j)$, $S^2(b_{jl})$, $S^2(b_{jj})$ – дисперсии соответствующих коэффициентов уравнения регрессии,

$$S^2\left(b_0\right) = a_1 S_Y^2;\ S^2\left(b_j\right) = a_3 S_Y^2;\ S^2\left(b_{jl}\right) = a_4 S_Y^2;\ S^2\left(b_{jj}\right) = (a_5 + a_6) S_Y^2.$$

Дисперсия экспериментов

$$S_Y^2 = \frac{\sum_{i=1}^{N} S_{i(Y)}^2}{N} = \frac{\sum_{i=1}^{N}\left(\overline{Y_i} - \hat{Y}_i\right)^2}{N} = \frac{0{,}0929}{20} = 0{,}0046.$$

Дисперсия коэффициентов $S^2(b_0)$ = 0,0008, $S^2(b_j)$ = 0,0003, $S^2(b_{jl})$ = = 0,0006, $S^2(b_{jj})$= 0,0003. Расчетные значения критерия Стьюдента $t_{b0}$ = 3532,5, $t_{b1}$ = 2340, $t_{b2}$= 1026,6, $t_{b3}$= 510, $t_{b12}$ = $t_{b23}$ = 13,3, $t_{b13}$ = 30, $t_{b11}$ = 3,33, $t_{b22}$ = 180, $t_{b33}$ = 150.

Сравнивая расчетные значения критерия Стьюдента с табличным ($t_{0,05}(5)$ = 2,57), получаем все коэффициенты значимыми. Уравнение регрессии принимает вид

$$\hat{Y}_1 = 2{,}826 + 0{,}702\,X_1 + 0{,}308X_2 - 0{,}520X_3 - 0{,}008\,(X_1X_2 + X_2X_3) +$$
$$+\,0{,}018\,X_1X_3 + 0{,}001\,X_1^2 - 0{,}054\,X_2^2 - 0{,}045\,X_3^2. \qquad (1a)$$

Наибольшее отклонение модельных значений $\hat{Y}_1$ от экспериментальных (табл. 2) наблюдается в 9-м эксперименте и равно 4,91 %.

Далее определяем остаточную дисперсию экспериментов:

$$S_{\text{ост}}^2 = \frac{\sum_{i=1}^{N} S_i^2(Y)}{f_{\text{ост}}} = \frac{\sum_{i=1}^{N}\left(\overline{Y_i} - \hat{Y}_i\right)^2}{N - B} = \frac{0{,}0929}{20-10} = 0{,}0093,$$

где $f_{\text{ост}}$ = 10 – число степеней свободы остаточной дисперсии;

$B$ = 10 – число значимых коэффициентов уравнения регрессии.

Дисперсию воспроизводимости определяли по опытам в центре плана [1]. В качестве расчетной принята выборка, состоящая из 6 экспериментов, взятых из 18 дублей в центре плана:

$$S_{\text{воспр}}^2 = \frac{\sum_{u=1}^{n_0} S_u^2(Y)}{f_{\text{воспр}}} = \frac{\sum_{u=1}^{n_0}\left(Y_u^0 - \overline{Y_u^2}\right)^2}{n_0 - 1} = \frac{0{,}0696}{6-1} = 0{,}0139,$$

где $f_{\text{воспр}}$ – число степеней свободы дисперсии воспроизводимо сти, $f_{\text{воспр}}$ = 5;

$\overline{Y}_u^0$ – среднее значение параметра, определяемого по $n_0$-м параллельным опытам в центре плана,

$$\overline{Y}_u^{\,0} = \frac{\sum\limits_{u=1}^{n_0} Y_u^0}{n_0} = \frac{17{,}38}{6} = 2{,}89;$$

$Y_u^0$ – $u$-е значение параметра, $u$ = 1, 2, 3, ..., $n_0$, $n_0$ = 6;
$Y_1^0$ = 2,8; $Y_2^0$ = 2,78; $Y_3^0$ = 2,9; $Y_4^0$ = 3,1; $Y_5^0$ = 2,95; $Y_6^0$ = 2,85.

Проверку адекватности уравнения регрессии (1) производили по критерию Фишера. При этом табличное значение критерия Фишера

$$F_{1\text{-}p} = (f_{\text{ад}}, f_{\text{восп}}) = F_{0,95}\,(5{,}5) = 5{,}05,$$

где $f_{\text{ад}}$ – число степеней свободы дисперсии адекватности ($p$ = 0,05 – 5 %-й уровень значимости), $f_{\text{ад}} = f_{\text{ост}} - f_{\text{воспр}}$ = 10 – 5 = 5.

Дисперсия адекватности

$$S_{\text{ад}}^2 = \frac{S_{\text{ост}}^2 f_{\text{ост}} - S_{\text{воспр}}^2 f_{\text{воспр}}}{f_{\text{ад}}} = \frac{0{,}0093\cdot 10 - 0{,}0139\cdot 5}{5} = 0{,}0047.$$

Расчетное значение критерия Фишера определяли из выражения

$$F_{\text{расч}} = \frac{S_{\text{ад}}^2}{S_{\text{воспр}}^2} = \frac{0{,}0047}{0{,}0139} = 0{,}338 < 5{,}05.$$

Так как $F_{\text{расч}} < F_{1\text{-}p}\,(f_{\text{ад}}, f_{\text{воспр}})$, то уравнение (1) адекватно описывает исследуемый процесс.

Как известно [1], метод крутого восхождения по поверхности отклика Бокса–Уилсона основан на свойствах градиента скалярной функции

$$\nabla^T f(x) = \left\langle \frac{\partial f}{\partial x_1}; \frac{\partial f}{\partial x_2}; \cdots; \frac{\partial f}{\partial x_n} \right\rangle. \tag{2}$$

Градиент скалярной функции всегда ортогонален линии уровня, проходящей через данную точку, и направлен в сторону наискорейшего подъема (спуска).

Алгоритм этого метода заключается в отыскании градиента функции отклика в центре плана. Затем рассчитывают шаги по всем факторам из центра плана в направлении крутого восхождения и проводят серию экспериментов с центром в точке, соответствующей движению к оптимуму. Далее процедура повторяется до достижения экстремума.

Согласно метода Бокса–Уилсона принимаем условие одинаковой скорости движения по всем факторам, которое дает следующую зависимость между шагами по факторам:

$$\frac{h_1}{b_1 \Delta x_1} = \frac{h_2}{b_2 \Delta x_{21}} = \cdots = \frac{h_n}{b_n \Delta x_n} = \gamma\,, \tag{3}$$

где $h_j$ – шаг движения для $j$-го фактора;
$\Delta x_j$ – интервал варьирования $j$-го фактора.

При этом задаются значением $h_{\text{б}}$ для одного из факторов, называемого базовым:

$$\gamma = \frac{h_б}{b_б \Delta x_б}, \qquad (4)$$

где $b_б$ и $\Delta x_б$ – коэффициент уравнения регрессии и интервал варьирования для базового фактора.

Для нашего случая выберем в качестве базового фактор $x_1$. Обычно $h_б < \Delta x_б$. Пусть $h_б = 0{,}01$. Тогда

$$\gamma = \frac{0{,}01}{0{,}702 \cdot 0{,}05} = 0{,}285.$$

Варьируемые факторы для экспериментов рассчитывают по следующим формулам:

$$\left.\begin{aligned} x_1 &= x_{01} - \gamma\, b_1 \Delta x_1, \\ x_2 &= x_{02} - \gamma\, b_2 \Delta x_2, \\ x_3 &= x_{03} - \gamma\, b_3 \Delta x_3. \end{aligned}\right\} \qquad (5)$$

Для дальнейших расчетов необходимо определить коэффициенты уравнения регрессии в натуральных переменных. Тогда уравнение (1) примет вид

$$\begin{aligned} \hat{Y}_1 = {} & 2{,}826 + 0{,}702\left(\frac{x_1 - x_{01}}{\Delta x_1}\right) + 0{,}308\left(\frac{x_2 - x_{02}}{\Delta x_2}\right) - 0{,}153\left(\frac{x_3 - x_{03}}{\Delta x_3}\right) - \\ & - 0{,}008\left(\frac{x_1 - x_{01}}{\Delta x_1}\right)\left(\frac{x_2 - x_{02}}{\Delta x_2}\right) - 0{,}008\left(\frac{x_2 - x_{02}}{\Delta x_2}\right)\left(\frac{x_3 - x_{03}}{\Delta x_3}\right) + \\ & + 0{,}018\left(\frac{x_1 - x_{01}}{\Delta x_1}\right)\left(\frac{x_3 - x_{03}}{\Delta x_3}\right) + 0{,}001\left(\frac{x_1 - x_{01}}{\Delta x_1}\right)^2 - 0{,}054\left(\frac{x_2 - x_{02}}{\Delta x_2}\right)^2 - \\ & + 0{,}045\left(\frac{x_3 - x_{03}}{\Delta x_3}\right)^2. \end{aligned} \qquad (6)$$

После подстановки из табл. 1 в уравнение (6) значений $x_{01} = 0{,}17$, $x_{02} = 0{,}75$, $x_{03} = 0{,}76$, $\Delta x_1 = 0{,}05$, $\Delta x_2 = 0{,}25$ и $\Delta x_3 = 0{,}21$ окончательное уравнение регрессии в натуральных переменных будет иметь вид

$$\begin{aligned} \hat{Y}_1 = {} & -0{,}778 + 12{,}122 x_1 + 2{,}535 x_2 + 0{,}645 x_3 + 0{,}64 x_1 x_2 - \\ & - 0{,}152 x_2 x_3 + 1{,}714 x_1 x_3 + 0{,}4 x_1^2 - 0{,}864 x_2^2 - 1{,}02 x_3^2. \end{aligned} \qquad (7)$$

На основании данных табл.1 и уравнения регрессии (1) получены исходные характеристики для расчета шагов движения (табл. 3).

Таблица 3

| Характеристика | Значение характеристики в центре плана | Диапазон варьирования | Шаг варьирования | Коэффициенты $b_j$ уравнения (1) |
|---|---|---|---|---|
| $x_1$ | 0,17 | 0,254…0,086 | 0,05 | 0,702 |
| $x_2$ | 0,75 | 1,17…0,33 | 0,25 | 0,308 |
| $x_3$ | 0,76 | 1,13…0,407 | 0,21 | 0,153 |

Шаги движения для двух остальных факторов без учета знака рассчитывают по следующим формулам:

$$h_2 = \gamma\,\Delta x_2 b_2 = 0{,}285\cdot 0{,}25\cdot 0{,}308 = 0{,}0219 \approx 0{,}025;$$
$$h_3 = \gamma\,\Delta x_3 b_3 = 0{,}285\cdot 0{,}21\cdot 0{,}153 = 0{,}00916 \approx 0{,}01. \qquad (8)$$

Для определения знака шагов движения $h_i$ по факторам вычислен градиент функции отклика $\Delta Y(x_j)$ для переменных факторов. Градиенты для факторов $x_1$, $x_2$ имеют положительный знак, для фактора $x_3$ – отрицательный. Следовательно, для отыскания $Y_{1\min}$ необходимо двигаться по факторам $x_j$ от их основного значения в центре плана в противоградиентом направлении, т. е. с противоположным по знаку шагом $h_i$ ($h_1$ = –0,01, $h_2$ = – 0,025, $h_3$ = 0,01).

Далее необходимо ввести ограничения на факторы

$$\Omega\!:\begin{bmatrix} 0{,}08 \le x_1 \le 0{,}25 \\ 0{,}325 \le x_2 \le 1{,}175 \\ 0{,}40 \le x_3 \le 1{,}15 \end{bmatrix}. \qquad (9)$$

Из-за невозможности реализации фактора $x_1$ с шагом $h_1$ в этих точках проводили мысленный эксперимент и после каждого шага рассчитывали отклик по уравнению (7). В области ограничений (9) и с шагами движения $h_1$ = –0,01, $h_2$ = –0,025 и $h_3$ = 0,01 параметр $\hat{Y}_{1\min}$ = 0,437 % при переменных факторах $x_1$ = 0,08, $x_2$ = 0,325 и $x_3$ = 1,15.

При пропускании через постоянный рабочий зазор РФК с разной толщиной бересты ($S_б$ = 1,0 ... 2,0 мм, получаемой с чураков диаметром $D$ = 160 ... 320 мм, и $S_б$ = 2,0 ... 4,0 мм, получаемой с чураков $D$ = 320... 550 мм [3]) необходимо оптимальное значение $\Delta p/S_б$ = 0,325 назначать для наиболее толстой бересты в каждой группе толщин, т. е. $\Delta p_1/2$ = $\Delta p_2/4$ = = 0,325. Оптимальный рабочий зазор $\Delta p$ для первой группы толщин бересты составляет 0,65 мм, для второй –1,30 мм.

Для минимальной толщины бересты в любой группе толщин соотношение $\Delta p/S_б$ = 0,65/1,0 = 0,65. Параметр $\hat{Y}_1$ для $x_2$ = 0,65, $x_1$ = 0,08 и $x_3$ = 1,15 м/с по уравнению (7) равен 0,947 %.

Среднее оптимальное значение для каждой группы толщин бересты $\overline{Y_1}$ = $\overline{Л}_{н1}$ = 0,5 (0,437 + 0,947) = 0,692 %.

Оптимальное значение $\overline{Л}_{н1}$ = 0,692 % для бересты различных толщин соответствует высокому качеству отделения луба от бересты, так как много меньше его допускаемого значения $[Л_{н1}]$ = 1,5 %, соответствующего первому сорту бересты на этапе фрезерования. При этом обеспечивается запас на производственные условия по качеству отделения:

$$n_{з(ПУ)} = [Л_{н1}]/\,\overline{Л}_{н1} = 1{,}5/0{,}692 = 2{,}17.$$

Под производственными условиями понимаются затупление ножей, неточность установки рабочего зазора и его увеличение за счет износа ножей, увеличение разнотолщинности бересты, сбои в работе ориентирующего устройства.

При работе в производственных условиях допускаемое значение массовой доли неотделившегося от бересты луба на этапе фрезерования луба определяется из следующего условия:

$$[\overline{Л}_{н1}] = \frac{[Л_н]_\Sigma - [Л_{н2}]n_{з(НУ)}}{n_{з(НУ)}} = \frac{3 - 1{,}0 \cdot 1{,}2}{1{,}2} = 1{,}5\ \%,$$

где $[Л_н]_\Sigma = 3\%$ – допускаемая величина массовой доли луба в бересте1-го сорта;

$[Л_{н2}] = 1{,}0\ \%$ – допускаемая величина массовой доли луба, неотделившегося от бересты в пневмосепараторе;

$n_{з(НУ)} = 1{,}2$ – коэффициент запаса по критерию качества бересты на неуточненные условия (увеличение влажности луба, находящегося в бересте, в процессе хранения на производстве и транспортирования ее к пункту сдачи в летнее время и т. п.).

*Выводы*

1. Математико-статистическая модель (1) для массовой доли луба, неотделившегося от бересты, дает хорошее приближение к данным, полученным экспериментальным путем (табл. 2), и адекватно описывает исследуемый процесс.

2. В результате минимизации массовой доли неотделившегося от бересты луба определены экстремум ($Y_{1min} = 0{,}437$ %) и условия его получения ($x_1 = 0{,}08$, $x_2 = 0{,}325$, $x_3 = 1{,}15$).

3. Оптимальный режим отделения луба от бересты в измельченных отходах окорки березового фанерного сырья: $v_2/v_1 = 0{,}08$, $\Delta p/S_б = 0{,}325$ и $v_2 = 1{,}15$ м/с.

4. Для получения показателя $\overline{Л}_{н1} = 0{,}692$ % необходимо установить следующий рабочий зазор $\Delta p$ между роторами: 0,65 мм – для первой группы толщин бересты $S_б = 1{,}0 \ldots 2{,}0$ мм; 1,3 мм – для второй группы толщин бересты $S_б = 2{,}0 \ldots 4{,}0$ мм.

5. Оптимальное значение $\overline{Л}_{н1} = 0{,}692$ % для бересты различных толщин соответствует высокому качеству отделения луба от бересты, так как значительно меньше его допускаемого значения $[Л_{н1}] = 1{,}5$ %, соответствующего первому сорту бересты на этапе фрезерования луба.

6. Оптимальный режим отделения луба от бересты обеспечивает большой запас на производственные условия по качеству отделения, т. е. $n_{з(ПУ)} = [Л_{н1}]/\overline{Л}_{н1} = 2{,}17$. Поэтому необходимо проводить дополнительную оптимизацию режимов отделения луба от бересты и параметров отделяющих роторов по критерию стоимости.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1]. Ахназарова Ф.Л., Кафаров В.В. Оптимизация эксперимента в химии и химической технологии. - М.: Высш. шк., 1978. - 350 с. [2]. Воскресенский В.Е. Критерии качества бересты в технологической системе разделения отходов окорки фанерного сырья на компоненты с учетом влажности материалов // Технология и оборудование деревообрабатывающих производств: Межвуз. сб. науч. тр. - Л.: ЛТА, 1987. - 120 с. [3]. Воскресенский В.Е. Технологическая система разделения отходов окорки березового фанерного сырья на луб и бересту // Вестник СПб ЛТА. - 1996. - Вып. 4 (162). - С. 106 - 115.

Поступила 16 мая 1996 г.