

УДК 62-529

В.А. ШАМАЕВ, В.С. ПЕТРОВСКИЙ, Н.И. ВИННИК, А.Е. ЧААДАЕВ

Шамасв Владимир Александрович родился в 1950 г., окончил в 1972 г. Воронежский государственный университет, доктор технических наук, заместитель директора по науке Научно-производственного центра «ВОСМОДРЕВ» при Воронежской государственной лесотехнической академии. Имеет 32 изобретения в области модификации древесины.



Винник Николай Иосифович родился в 1927 г., окончил в 1951 г. Львовский лесотехнический институт, кандидат технических наук, профессор, заместитель генерального директора Научно-производственного центра «ВОСМОДРЕВ» при Воронежской государственной лесотехнической академии, председатель Межгосударственного технического комитета МТК-196 по стандартизации, руководитель Испытательного центра и заместитель руководителя Органа по сертификации, главный ученый секретарь и академик Академии проблем качества РФ. Имеет около 90 научных трудов в области комплексного использования древесного сырья.



Чаадаев Анатолий Евгеньевич родился в 1939 г., окончил в 1961 г. Воронежский лесотехнический институт, кандидат технических наук, старший научный сотрудник Научно-производственного центра «ВОСМОДРЕВ» при Воронежской государственной лесотехнической академии. Имеет около 80 научных работ в области модификации древесины, прессования и изучения триботехнических характеристик.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА МОДИФИЦИРОВАНИЯ ДРЕВЕСИНЫ И ЕГО ОПТИМИЗАЦИЯ

Использован метод планирования эксперимента для определения оптимальных режимов производства модифицированной древесины; получены математические модели, устанавливающие зависимости плотности, прочности, разбухания, ударной вязкости и себестоимости модифицированной древесины от технологических факторов. Представлены результаты многокритериальной оптимизации технологического процесса производства модифицированной древесины с помощью метода последовательных уступок.

The method of experiment planning for determining the optimal conditions of producing modified wood has been used; the mathematical models, determining the relations between density, strength, swelling, impact strength, cost price of the modified wood and the technological factors have been constructed. The results of multi-criteria optimization of the technological process of producing modified wood by means of the consecutive yielding have been presented.

В настоящее время модифицированная древесина находит применение в качестве заменителя древесины твердых лиственных пород, черных и цветных металлов, пластмасс и т.д. [4].

На качество модифицированной древесины, полученной методом прессования, влияет большое число технологических факторов: ее исходная плотность, влажность, порода, степень прессования и т.д. [3]. Системный анализ и экспертная оценка факторов показали, что десять из них являются значимыми. Они относятся к регулируемым, в дальнейшем будем называть их входными. К нерегулируемым относятся точность механической обработки, скрытые пороки древесины, распределение модификатора и влаги в образцах древесины и др.

Модифицированная древесина имеет более чем 60 показателей физико-механических, эксплуатационных и эргономических свойств. Для моделирования процесса были отобраны 5 наиболее важных факторов, каждый из которых характеризует совокупность показателей других свойств. Эти пять факторов будем называть выходными (или целевыми функциями).

Для проверки значимости входных и выходных факторов была проведена их экспертная оценка методом ранговой корреляции [2]. Результаты априорного ранжирования показали, что все 10 входных и 5 выходных факторов являются значимыми.

Математическое планирование эксперимента проводили по методике Бокса—Уилсона [1]. В табл. 1 представлены входные факторы и их уровни (в порядке убывания по степени значимости).

Таблица 1

| Код | Фактор | Уровни фактора | | |
|-----------------|------------------------------------------------------|----------------|-------|--------|
| | | -1 | 0 | +1 |
| X ₁ | Исходная плотность, кг/м ³ | 450 | 550 | 650 |
| X ₂ | Исходная влажность, % | 10 | 20 | 30 |
| X ₃ | Степень прессования, % | 30 | 40 | 50 |
| X ₄ | Условный предел прочности, МПа | 5 | 10 | 15 |
| X ₅ | Температура древесины, К | 313 | 333 | 353 |
| X ₆ | Угол наклона волокон к радиальному направлению, град | 0 | 45 | 90 |
| X ₇ | Температура термообработки, К | 393 | 413 | 433 |
| X ₈ | Продолжительность термообработки, ч | 4 | 6 | 8 |
| X ₉ | Скорость прессования, мм/мин | 4 | 22 | 40 |
| X ₁₀ | Порода | Тополь | Осина | Береза |

Значения входных факторов кодировали по формуле

$$X_i = \frac{\bar{X}_j - X_{j0}}{I_j}, \quad (1)$$

где X_i - кодированное значение фактора;

\bar{X}_j - натуральное значение фактора;

X_{j0} - натуральное значение основного уровня;

I_j - интервал варьирования.

Выходные факторы в порядке убывания их значимости приведены в табл. 2.

Таблица 2

| Код | Фактор | Направление оптимизации | Оптимальное значение фактора |
|----------------|----------------------------------------------------------------------|-------------------------|------------------------------|
| Y ₄ | Конечная плотность, кг/м ³ | max | 1360 |
| Y ₁ | Предел прочности при сжатии вдоль волокон, МПа | max | 182 |
| Y ₂ | Объемное разбухание, % | min | 25,1 |
| Y ₃ | Ударная вязкость, кДж/м ² | max | 12 |
| Y ₅ | Себестоимость модифицированной древесины, доллар США /м ³ | min | 183 |

Из-за большого числа входных факторов и невозможности проведения полного факторного эксперимента использовали реплику 2^{10-6} . Матрица ротатабельного планирования второго порядка состоит из трех блоков. В первый входят опыты 1–8 плана 2^{10-7} и опыты 9–16, являющиеся зеркальным отражением первого плана. Второй блок (опыты 17–36) построен с использованием звездного плеча, третий – (опыты 37–50) – из произвольной комбинации первых двух блоков по принципу наибольшей вариабельности факторов в опытах.

По построенной матрице был проведен активный эксперимент на 15-ти образцах в каждом опыте. В результате обработки экспериментальных данных методом наименьших квадратов на ПЭВМ, проверки адекватности моделей с использованием критерия Фишера и значимости коэффициентов с помощью критерия Стьюдента были получены следующие зависимости показателей свойств модифицированной древесины от входных факторов:

для прочности

$$\begin{aligned}
 Y_1 = & -4975,176 + 0,85X_1 + 56,066X_2 - 47,368X_3 + 30,428X_7 + 3,174X_8 + \\
 & + 6,295X_9 + 319,596X_{10} + 0,0003851 X_1^2 - 0,00397X_1X_2 - 0,02627 X_1X_3 + \\
 & + 0,179 X_1X_8 - 0,001361 X_1X_9 - 0,02462 X_{10}X_1 - 0,0481 X_2^2 + 0,418 X_2X_3 - \\
 & - 0,124 X_2X_7 - 2,758 X_2X_8 - 0,0917 X_2X_9 - 1,819 X_2X_{10} - 0,0234 X_3^2 - 0,015 \times \\
 & \times X_3X_9 - 0,445 X_3X_8 + 0,167 X_3X_9 + 3,04 X_3X_{10} - 0,0423 X_7^2 - 0,401 X_7X_8 + \\
 & + 0,0597 X_7X_9;
 \end{aligned} \tag{2}$$

для разбухания

$$\begin{aligned}
 Y_2 = & 737,82 - 5,43X_3 - 16,09X_4 - 6,45X_7 + 18,49X_8 - 4,57X_9 + 0,00706 X_3^2 + \\
 & + 0,0249 X_3X_4 + 0,0281 X_3X_7 + 0,1766 X_3X_8 - 0,00144 X_3 X_9 - 0,00251 X_4^2 + \\
 & + 0,0734 X_4 X_7 + 0,703 X_4 X_8 - 0,000925 X_4X_9 + 0,01405 X_7^2 - 0,11 X_7X_8 + \\
 & + 0,022X_7X_9 - 1,95 X_8^2 + 0,215X_8X_9 + 0,00569 X_9^2;
 \end{aligned} \tag{3}$$

для ударной вязкости

$$\begin{aligned}
 Y_3 = & -73,34 + 0,075X_1 - 0,0386X_2 + 0,543X_3 + 0,1298X_9 + 4,93X_{10} - \\
 & - 0,0000087 X_1^2 + 0,0000352X_1X_2 - 0,0000182 X_1 X_3 - 0,0001348 X_1X_9 - \\
 & - 0,0025 X_1 X_{10} - 0,000052 X_2^2 + 0,00003545 X_2 X_3 + 0,00105 X_2 X_9 + \\
 & + 0,0193 X_2X_{10} + 0,0014 X_3X_9 - 0,0259 X_3X_{10} - 0,000277 X_9^2 - 0,00047 X_9X_{10} - \\
 & - 0,0803 X_{10}^2;
 \end{aligned} \tag{4}$$

для плотности

$$Y_3 = 26366,53 - 11,19X_1 + 86,84X_2 - 366,16X_3 - 80,54X_9 - 1755,06X_{10} - 0,001 X_1^2 - 0,005X_1X_2 + 0,026 X_1X_3 + 0,041 X_1X_9 + 0,686 X_1X_{10} + 0,135 X_2^2 + 0,046 X_2 X_3 - 0,27 X_2 X_9 - 4,7 X_2X_{10} + 0,372 X_3^2 + 0,952 X_3X_9 + 17,5 X_3X_{10} - 0,003 X_9^2 + 1,436 X_9X_{10} + 20,66 X_{10}^2; \quad (5)$$

для себестоимости

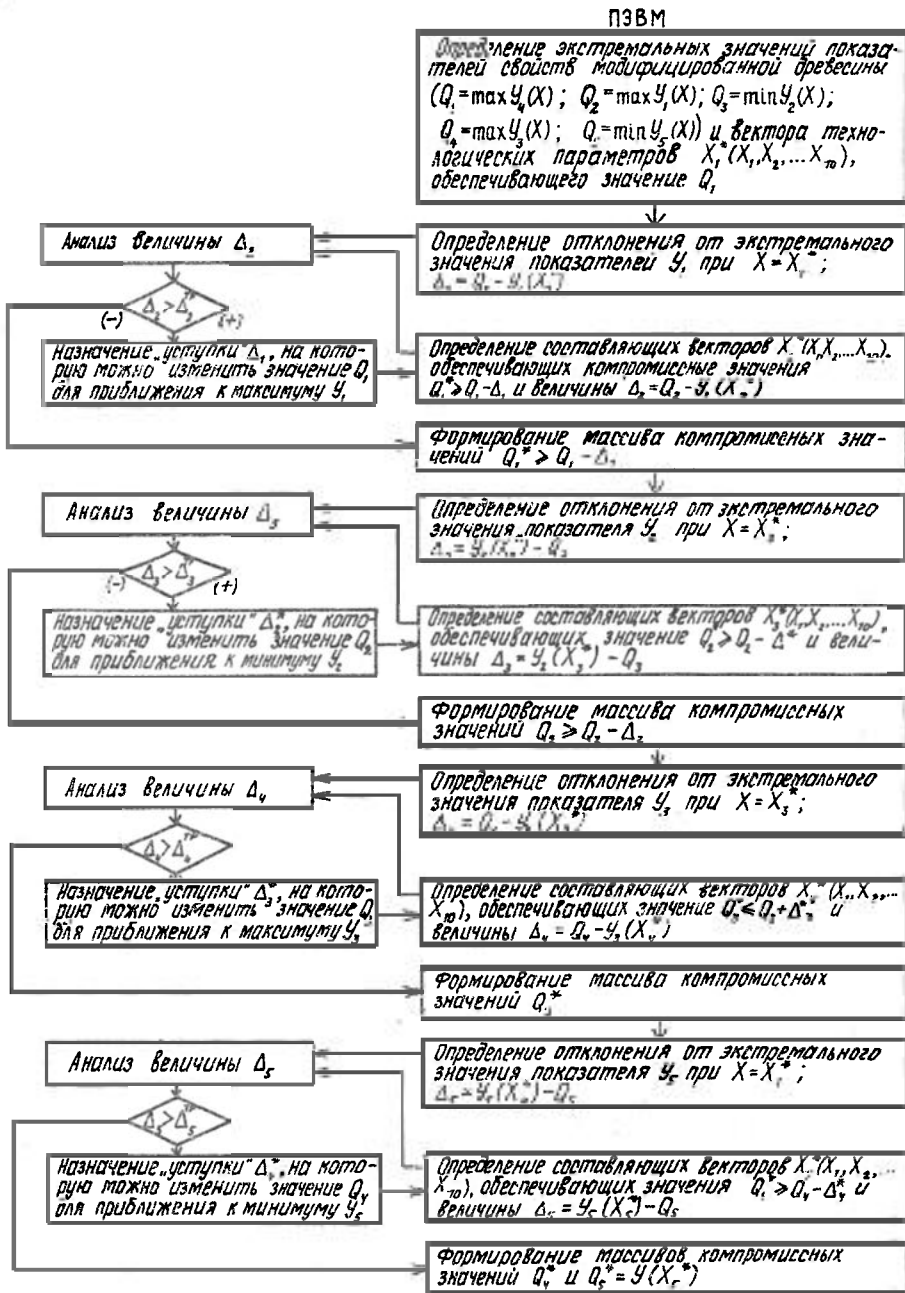
$$Y_3 = - 42903,29 - 0,185X_1 - 144,19 X_2 + 1181,40 X_3 + 910,34 X_4 + 263,14 X_7 + 1113,74 X_8 + 73,79 X_9 - 714,45 X_{10} + 0,0042 X_1^2 - 0,117 X_1X_2 - 0,149 X_1 X_3 + 0,481X_1X_4 - 0,019 X_1X_7 + 0,0278 X_1 X_8 - 0,0384 X_1 X_9 + 0,1636 X_1 X_{10} + 0,0263 X_2^2 + 0,44X_2 X_3 - 9,44X_2 X_4 - 3,15 X_2X_7 + 29,861 X_2X_8 - 0,0477 X_2X_9 + 30,415 X_2X_{10} + 0,442 X_3^2 + 1,79 X_3X_4 - 3,99 X_3X_7 - 45,65 X_3X_8 - 2,2 X_3X_9 - 15,34 X_3X_{10} + 0,36 X_4^2 + 0,0537 X_4X_7 - 30,57 X_4X_8 + 11,81 X_4X_9 - 63,65 X_4X_{10} - 0,0154 X_7^2 - 634 X_7X_8 - 1,87 X_7X_9 + 2,49 X_7X_{10} + 2,884 X_8^2 - 27,56 X_8X_9 + 103,76 X_8X_{10} + 0,00887 X_9^2 + 19,20 X_9X_{10} - 3,39 X_{10}^2. \quad (6)$$

Путем варьирования значений входных факторов в уравнениях (2) – (6) можно получать модифицированную древесину с требуемыми свойствами. Однокритериальная оптимизация уравнений (2) – (6), проведенная на УВМ – компьютере, позволила выявить для каждого из показателей свойств оптимальные значения (максимальные или минимальные), представленные в табл. 2.

Для проведения многокритериальной оптимизации процесса был использован метод последовательных уступок [3]. Выбор этого метода обусловлен его большой универсальностью, ориентированностью на возможности лица, принимающего решение, а также тем, что он позволяет выявлять оптимальные значения входных параметров практически при любой системе предпочтений на множестве критериев.

Блок-схема диалоговой системы, реализующей данный метод для определения оптимальных параметров технологического процесса, представлена на рисунке .

Как следует из рисунка, выбор оптимальных технологических параметров представляет собой итерационную процедуру, в которой задачей лица, принимающего решение, является последовательное назначение «уступок» для каждого показателя и анализ получающихся компромиссных значений.



Блок-схема диалоговой системы оптимизации технологических параметров получения модифицированной древесины

Таблица 3

Оптимальные значения технологических параметров

| Код | Параметр | Значение параметра |
|----------|------------------------------------------------------|--------------------|
| X_1 | Исходная плотность, кг/м ³ | 650 |
| X_2 | Исходная влажность, % | 30 |
| X_3 | Степень прессования, % | 50 |
| X_4 | Условный предел прочности, МПа | 10 |
| X_5 | Температура древесины, К | 333 |
| X_6 | Угол наклона волокон к радиальному направлению, град | 90 |
| X_7 | Температура термообработки, К | 413 |
| X_8 | Продолжительность термообработки, ч | 8 |
| X_9 | Скорость прессования, мм/мин | 22 |
| X_{10} | Порода | Береза |

В результате назначения предельных уступок для каждого показателя $Y_1 - Y_5$ в пределах, пропорциональных их весовым коэффициентам, были получены оптимальные значения технологических параметров (табл. 3) и соответствующие им значения показателей свойств (табл. 4).

Методом ранговой корреляции установлены весовые коэффициенты показателей свойств (табл. 4).

Таблица 4

Показатели свойств модифицированной древесины

| Код | Показатель | Значение показателя | | | |
|-------|---------------------------------------------------------------------|---------------------|---------------|------------------------------------------------|---------------------|
| | | Экстремальное | Компромиссное | Отклонение компромиссного от экстремального, % | Весовой коэффициент |
| Y_4 | Конечная плотность, кг/м ³ | 1360 | 1350 | 2 | 0,310 |
| Y_1 | Предел прочности при сжатии вдоль волокон, МПа | 182 | 163 | 7 | 0,234 |
| Y_2 | Объемное разбухание, % | 25,1 | 37,2 | 15,0 | 0,197 |
| Y_3 | Ударная вязкость, кДж/м ² | 12,0 | 11,3 | 6,0 | 0,137 |
| Y_5 | Себестоимость модифицированной древесины, доллар США/м ³ | 183 | 251 | 28 | 0,122 |

Экспериментальная проверка математических моделей и результатов многокритериальной оптимизации подтвердила их достоверность. Разработанные модели и результаты многокритериальной оптимизации позволяют получать модифицированную древесину с заданным набором свойств.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1]. Адлер Ю.П., Маркова Е.В., Грановский Ю.В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. - М.: Наука, 1974. - 283 с. [2]. Ермаков С.М., Жиглявский А.А. Математическая теория оптимального эксперимента. - М.: Наука, 1987. - 320 с. [3]. Хухрянский П.Н. Прессование древесины. - М.: Лесн. пром-сть, 1974. - 283 с. [4]. Шаманов В.А. Модификация древесины. - М.: - Лесн. пром-сть, 1991. - 123 с.
-

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ И ОБМЕН ОПЫТОМ

УДК 630*383

С.А. ПАШКИН, Б.А. КОШЕЛЕВ

Пашкин Серафим Алексеевич родился в 1935 г., окончил в 1962 г. Уральский лесотехнический институт, кандидат технических наук, доцент кафедры транспорта леса Уральской государственной лесотехнической академии. Имеет 47 печатных работ по проблемам промышленного транспорта.



Кошелев Борис Анатольевич родился в 1950 г., окончил в 1973 г. Уральский лесотехнический институт, кандидат технических наук, доцент кафедры транспорта леса Уральской государственной лесотехнической академии. Имеет 36 печатных работ по проблемам промышленного транспорта.

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЗМЕРОВ ВОДООТВОДНЫХ КАНАВ
В ЗАВИСИМОСТИ ОТ СКОРОСТИ ТЕЧЕНИЯ**

Рассмотрен пример графического определения ширины и глубины водоотводных канав в зависимости от скорости течения и расхода воды.

An example of graphic determination of the width and depth of water drainage depending on flow speed and water consumption has been considered.

Приток воды к малым искусственным сооружениям при проектировании железных и автомобильных дорог общего пользования рассчитывают по различным методикам. Так, в учебной литературе для студентов железнодорожных специальностей [4] гидравлический расчет