

УДК 677.816:66.045

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ЗАТРАТ В ТЕКСТИЛЬНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ\*

### MODELLING OF POWER EXPENSES IN TEXTILE INDUSTRY

*А.А. ГЕРАЩЕНКО, В.М. КАРАВАЙКОВ*  
A.A. GERASHCHENKO, V.M. KARAVAIKOV

(Костромской государственный технологический университет)  
(Kostroma State Technological University)  
E-mail: krice2010@yandex.ru

*Сформулирована целевая функция энергоэффективности – зависимость показателя эффективности от параметров процессов преобразования энергии в элементах системы текстильного производства, определена адекватная математическая модель энергопотребляющего объекта. При поиске оптимального режима сушки в качестве функции регрессии принят показатель прямых обобщенных энергозатрат.*

*Criterion function of power efficiency problem – dependence of an efficiency indicator on the parameters of processes of energy transformation in the elements of the system of textile manufacture has been formulated, the adequate mathematical model of energy-requiring object has been defined. When searching an optimum mode of drying the indicator of the direct generalized power inputs has been accepted as a regress function.*

**Ключевые слова:** энергоэффективность, параметры энергии, математическая модель, обобщенные энергозатраты, сушка, оптимальный режим.

**Keywords:** power efficiency, energy parameters, a mathematical model, generalized power inputs, drying, an optimum mode.

---

\* Работа выполняется при поддержке гранта Министерства образования и науки Российской Федерации ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОНТРАКТ № 14.740.11.1373

Применяемые нами модели в общем виде имеют форму уравнений, выражающих функцию целей:

$$y = f(x_i, z_j, w_\ell), \quad (1)$$

где  $y$  – критерий оптимальности, характеризующий качество поведения системы;  $x_i$  – управляемые независимые переменные;  $z_j, w_\ell$  – переменные и постоянные, которые влияют на критерий оптимальности, но не поддаются управлению.

Уравнение (1) вместе с принятыми ограничениями образует модель объекта ис-

следований и одновременно является моделью для принятия решений [1].

В данной работе сформулирована целевая функция проблемы энергоэффективности – зависимость показателя эффективности от параметров процессов преобразования энергии в элементах системы текстильного производства.

Управляемый параметр в системе управления энергоэффективностью  $y(t)$  – показатель эффективности использования энергии в соответствии с формулами [2] определяется:

$$Y(t) = \frac{R_E E \eta_E + R_W W \eta_W + R_B^T B_C \eta_C + R_B B_T \eta_T}{R_E E + R_W W + R_B B_{np}}. \quad (2)$$

Затраты электрической  $E$ , тепловой  $W$  энергии и топлива  $B_T$  формируют матрицу энергетических затрат:

$$(Y, F) = \begin{bmatrix} y_1 & x_{11} & \dots & x_{1m} \\ y_2 & x_{21} & \dots & x_{2m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ y_n & x_{n1} & \dots & x_{nm} \end{bmatrix}, \text{ ссс } (3)$$

где  $Y$  – вид энергоресурса;  $x_i$  ( $i = 1, \dots, m$ ) – параметры, влияющие на расход энергоресурса;  $y_j, x_{j1} \dots x_{jm}$  ( $j = 1, \dots, n$ ) – значения величин  $y, x_1, \dots, x_m$  для  $j$ -го энергоресурса.

$$Y = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \dots \\ y_n \end{bmatrix}, \quad F = \begin{bmatrix} x_{11} & \dots & \dots & x_{1m} \\ x_{21} & \dots & \dots & x_{2m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{n1} & \dots & \dots & x_{nm} \end{bmatrix}, \quad (4)$$

где  $Y$  – вектор результат;  $F$  – матрица плана эксперимента.

В системе управления энергоэффективностью адекватная математическая мо-

$$y(x_1, \dots, x_m) = b_0 + \sum_{i=1}^m b_i x_i + \sum_{i<j} b_{ij} x_i x_j + \sum_{i<j<l} b_{ijl} x_i x_j x_l + \dots + \sum_{i_1 < i_2 < \dots < i_m} b_{i_1 i_2 \dots i_m} x_{i_1} x_{i_2} \dots x_{i_m}, \quad (5)$$

где некоторые из параметров  $b_i, b_{ij} \dots$  неизвестны, а некоторые априори равны нулю. Параметр  $b_0$  в (5) называется общим средним, параметры  $b_i$  ( $i = 1, \dots, m$ ) – главными эффектами (взаимодействиями нулевого порядка);  $b_{ij}$  – эффектами взаимодействий

даль энергопотребляющего объекта должна определяться при минимально возможной длительности экспериментальных исследований. Поэтому в данной работе мы применяем теорию факторного планирования, которая позволяет строить экономичные планы эксперимента. В точках такого плана можно проводить просто реализуемые процедуры статистических выводов о неизвестных параметрах полиномиальных функций регрессии.

В общем случае функция регрессии имеет вид [1]:

первого порядка (эффектами двухфакторных взаимодействий);  $b_{ijl}$  – эффектами взаимодействий второго порядка (эффектами трехфакторных взаимодействий) и аналогично  $b_{i_1 i_2 \dots i_k}$  – эффектами взаимо-

действий  $k-1$  (эффектами  $k$ -факторных взаимодействий).

В проведенных исследованиях энергопотребляющих объектов применялись двухуровневые планы, то есть такие планы, факторы в которых принимают значения только на двух уровнях.

В проведенных исследованиях параметры функции регрессии (5) вычислялись по результатам измерений, проводимых согласно полному факторному плану и его дробным репликам, из уравнения [1]:

$$b_{\alpha} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N f_{\alpha}(j) y_j, \quad (6)$$

где  $N = 2^m$ ;  $b_{\alpha}$  – один из параметров  $b_{i_1 i_2 \dots i_{\ell}}$  ( $1 \leq \ell \leq m$ ) функции регрессии (5);  $f_{\alpha}$  – столбец матрицы плана  $F$  (4), соответствующий параметру  $b_{\alpha}$ ;  $y_1, \dots, y_N$  – результаты измерений.

Если случайные величины  $y_1, \dots, y_N$  некоррелированы и имеют одинаковую дисперсию  $\sigma^2$ , то из метода наименьших квадратов следует, что оценки (6) также некоррелированы, а их дисперсии равны  $\sigma^2/N$ .

На текстильных предприятиях предусмотренная технологией сушка пряжи и ровницы после влажностной обработки происходит при избыточном давлении воздуха в аппаратах типа СКД. Процесс характеризуется высокой энергоемкостью [2]. При поиске оптимального режима сушки в качестве функции регрессии мы приняли показатель прямых обобщенных энергозатрат. Основные параметры функции регрессии были определены априорно из анализа процесса сушки и предварительных однофакторных экспериментов. К этим параметрам относятся:  $P$  – давление воздуха в сушильном аппарате,  $\text{Н/м}^2$ ;  $t_1$  – температура воздуха, поступающего на сушку,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $V$  – удельный расход воздуха на одну паковку пряжи,  $\text{м}^3/\text{ч}$ ;  $\varphi$  – относительная влажность воздуха, %;  $q$  – удельный расход пара в процессе механического обезвоживания одной паковки с материалом,  $\text{кг/мин}$ .

Для определения зависимости прямых обобщенных энергозатрат от вышеперечисленных входных факторов методом корреляционного анализа составим регрессионную многофакторную модель. Для определения коэффициентов уравнения регрессии была составлена матрица планирования эксперимента в кодированных значениях факторов. По данным рабочей матрицы была определена величина прямых обобщенных энергозатрат для каждого опыта. Расчет проводился по нижеприведенным формулам.

Расход тепла в процессе механического обезвоживания паром:

$$Q_1 = D_{1\Pi} i''_1, \quad (7)$$

где  $D_{1\Pi}$  – расход пара за процесс механического обезвоживания;  $i''_1$  – энтальпия насыщенного пара.

Расход тепла на нагрев воздуха до температуры  $t_1$  в процессе сушки:

$$Q_2 = D_{2\Pi} i''_1, \quad (8)$$

где  $D_{2\Pi}$  – расход пара на нагрев воздуха в процессе сушки до температуры  $t_1$  в рекуперативном теплообменнике, определяемый из уравнения теплового баланса:

$$D_{2\Pi} = \frac{V \rho C_p (t_1 - t_3) \tau_c}{(i''_1 - i_k) \eta \cdot 60}, \quad (9)$$

где  $D_{2\Pi}$  – расход пара;  $V$  – расход воздуха;  $\tau_c$  – время сушки;  $\rho$  – плотность воздуха;  $C_p$  – средняя массовая теплоемкость воздуха;  $t_3$  – начальная температура воздуха (после охладителя);  $i''_1, i_k$  – энтальпия соответственно пара и конденсата;  $\eta$  – коэффициент, учитывающий потери тепла в окружающую среду.

Расход холодной воды на охлаждение воздуха в охладителе (определяемый из уравнения теплового баланса [3]):

$$G_{1B} = \frac{D_{1\Pi} (i''_1 - i'_1)}{i_2' - i_1'}, \quad (10)$$

где  $i_1'$ ,  $i_2'$  – энтальпия воды на входе в охладитель и на выходе;  $i_1''$  – энтальпия пара.

Требуемое количество охлаждающей воды для осушения воздуха путем конденсации водяных паров:

$$G_{2B} = \frac{V\rho C_p (t_{2cp} - t_3)\tau_c}{(i_2' - i_1')\eta \cdot 60}, \quad (11)$$

где:  $\tau_c$  – время сушки;  $C_p$  – средняя массовая теплоемкость воздуха в интервале температур  $t_{2cp} - t_3$ ;  $t_{2cp}$  – среднее значение температуры воздуха после сушки (перед охладителем);  $i_1'$ ,  $i_2'$  – энтальпия воды начальная и конечная.

Расход электроэнергии на сжатие  $1 \text{ м}^3$  воздуха:

$$W_1 = 0,0993 \frac{L_1}{3600 \cdot 1000 \eta_{ад}}. \quad (12)$$

Работа в адиабатном процессе сжатия  $1 \text{ м}^3$  воздуха [3]

$$L_1 = \frac{k}{k-1} P_1 \left[ \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right], \quad (13)$$

где  $W_1$  – расход электроэнергии, кВт·ч на  $1 \text{ м}^3$ ;  $L_1$  – работа при адиабатическом сжатии;  $P_1$ ,  $P_2$  – давление воздуха, соответ-

$$\int_0^{\tau_c} P_2 d\tau = \frac{h}{2} \left( P_{2_0} + 2 \sum_{i=1}^{n-1} P_{2_i} + P_{2_n} \right) + R, \quad R = -\frac{h^2 \tau_c}{12} M_2, \quad (17)$$

где  $R$  – погрешность вычисления интеграла, которая оценивается по величине максимальной второй производной функции в некоторой внутренней точке интервала  $[0; \tau_c]$ ;  $h$  – шаг интегрирования, в данном случае интервал времени, через который проводятся замеры  $t_2$ .

Вторая производная определялась численным дифференцированием по формуле:

венно начальное и конечное;  $k$  – показатель адиабаты;  $\eta_{ад}$  – адиабатный КПД.

Расход электроэнергии на продавливание теплоносителя сквозь слой материала:

$$W_2 = \frac{L_2}{3600 \cdot 1000 \eta} \frac{\tau_c}{60}, \quad (14)$$

$$L_2 = \frac{k}{k-1} P_1 V \left[ \left( \frac{P_{2cp}}{P_1} \right) - 1 \right], \quad (15)$$

где  $W_2$  – расход электроэнергии, кВт·ч;  $L_2$  – работа при адиабатическом сжатии;  $\tau_c$  – время сушки;  $P_{2cp}$  – среднее за время сушки давление воздуха перед слоем пряжи;  $P_1$  – давление воздуха после слоя пряжи;  $V$  – расход воздуха.

В процессе сушки  $P_2$  изменяется. Контроль давления проводился через каждые 5 минут в течение всего процесса сушки. Среднее значение  $P_2$  за период сушки определялось методом численного интегрирования:

$$P_{2cp} = \frac{1}{n} \int_0^{\tau_c} P_2 d\tau, \quad (16)$$

где  $n$  – число замеров  $P_2$ ;  $\tau_c$  – время сушки;  $(P_2)_i$  – текущее значение  $P_2$  в процессе сушки.

Вычисление интеграла (16) осуществлялось методом трапеций, который является более приемлемым в данном случае и дает необходимую точность вычисления:

$$f''_0 = \frac{t_{2_{-1}} - 2t_{2_0} + t_{2_1}}{h^2}, \quad (18)$$

(0) – точка, где определяется производная; (–1) – предыдущая точка; (1) – последующая точка.

Искомая функция регрессии определялась для каждого опыта с учетом коэффициентов приведения различных видов энергии к единому измерителю (тонна условного топлива).

Используя данные рабочей матрицы и матрицы планирования, а также значения

выходного фактора  $Y_i$ , определяем коэффициенты регрессии [1]

$$b_0 = \frac{A}{N} \left[ 2\lambda^2(M+2) \sum_{u=1}^N \bar{Y}_u - 2\lambda C \sum_{i=1}^M \sum_{u=1}^N x_{iu}^2 \bar{Y}_u \right], \quad (19)$$

$$b_i = \frac{C}{N} \sum_{u=1}^N x_{iu} \bar{Y}_u, \quad (20)$$

$$b_{ij} = \frac{C^2}{N\lambda} \sum_{u=1}^N x_{iu} x_{ju} \bar{Y}_u, \quad (21)$$

$$b_{ii} = \frac{A}{N} \left\{ C^2[(M+2)\lambda - M] \sum_{u=1}^N x_{iu}^2 \bar{Y}_u + C^2(1-\lambda) \sum_{i=1}^M \sum_{u=1}^N x_{iu}^2 \bar{Y}_u - 2\lambda C \sum_{u=1}^N \bar{Y}_u \right\}, \quad (22)$$

где

$$A = \frac{1}{2\lambda[(M+2)\lambda - M]};$$

$$\lambda = \frac{MN}{(M+2)(N - N_{\text{ц}})}; \quad C = \frac{N}{\sum_{u=1}^N x_{iu}^2}; \quad (23)$$

$M$  – число факторов;  $N$  – число опытов;  $N_{\text{ц}}$  – число опытов, проведенных в центре эксперимента ( $N_{\text{ц}} = 1$ ).

Для проверки значимости коэффициентов регрессии используется критерий Стьюдента [1].

По результатам обработки экспериментальных данных получено уравнение регрессии, определяющее целевую функцию и представляющее собой полиномиальную регрессионную многофакторную модель второго порядка:

$$Y = 0,0535 + 0,0072X_1 - 0,0064X_2 + 0,0084X_3 - 0,00196X_4 + 0,0115X_5 - 0,0056X_1X_2 + 0,0021X_1X_5 - 0,0043X_2X_3 - 0,0041X_4X_5 - 0,0055X_1^2. \quad (24)$$

Анализ уравнения (24) показывает, что наибольшее влияние на величину прямых обобщенных энергозатрат оказывает параметр  $X_5$  – удельный расход пара на отжим. С уменьшением  $q$  значительно снижается величина  $Y(t)$ .

Снижение энергозатрат в несколько меньшей степени возможно за счет снижения давления воздуха, увеличения температуры, снижения расхода и увеличения относительной влажности воздуха. При этом наименьшее влияние на величину энергозатрат оказывает величина относительной влажности воздуха.

При выборе уровней факторов, обеспечивающих снижение прямых обобщенных энергозатрат в процессе сушки, необходимо учитывать наличие значимых взаимодействий факторов.

## ВЫВОДЫ

Учитывая знаки перед коэффициентами значимых взаимодействий  $X_1X_2$ ,  $X_1X_5$ ,  $X_2X_3$ ,  $X_4X_5$  в уравнении (24), можно заключить следующее.

1. При увеличении давления воздуха ( $X_1$ ) усиливается влияние на выходной параметр температуры воздуха ( $X_2$ ), а при увеличении фактора  $X_2$  ослабляется влияние на величину энергозатрат фактора  $X_1$ .

2. Положительное взаимодействие факторов  $X_1$  (давление воздуха) и  $X_5$  (удельный расход пара при отжиме) свидетельствует о том, что действие каждого из этих факторов на выходной параметр усиливается при повышении уровня другого.

3. При увеличении температуры воздуха ослабевает влияние на величину эксплуатационных затрат расхода воздуха ( $X_3$ ), а при увеличении расхода воздуха влияние температуры воздуха на выходной параметр усиливается.

4. Повышение расхода пара на отжим, то есть снижение начальной влажности пряжи перед сушкой, усиливает влияние на  $Y(t)$  относительной влажности воздуха. При увеличении относительной влажности воздуха ослабевает влияние на выходной параметр фактора  $X_4$ .

Следовательно, анализ полученного уравнения регрессии позволяет для каждого конкретного условия наметить наиболее

приемлемые пути повышения энергоэффективности процесса сушки.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. *Тихомиров В.Б.* Планирование и анализ эксперимента (при проведении исследований в легкой и текстильной промышленности). – М.: Легкая индустрия, 1974.

2. *Каравайков В.М.* Управление энергоэффективностью текстильного предприятия: Учебное пособие. – Кострома: Изд-во КГТУ, 2005.

3. *Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С.* Теплопередача: Учебник для вузов. – М.: Энергия, 1975.

Рекомендована кафедрой технологии производства льняного волокна. Поступила 01.06.12.