

Зависимость начального натяжения сетки сушильной части бумагоделательной машины от факторов режима эксплуатации

В.П. Сиваков^a, Н.В. Куцубина^b, С.Н. Исаков^c, А.В. Вураско^d, К.С. Исаева^e

Уральский государственный лесотехнический университет, ул. Сибирский Тракт, 37, Екатеринбург, Россия

^a sivakovvp@m.usfeu.ru, ^b nelly3416@mail.ru, ^c isakovsn@m.usfeu.ru,

^d vuraskoav@m.usfeu.ru, ^e isaeva.kseniya.98@mail.ru

^a <https://orcid.org/0000-0002-9387-1512>, ^b <https://orcid.org/0000-0002-0438-406X>, ^c <https://orcid.org/0009-0008-6236-6661>,

^d <https://orcid.org/0000-0002-9471-085X>, ^e <https://orcid.org/0000-0003-1506-1036>

Статья поступила 12.04.2024, принята 15.05.2024

Приводы многоцилиндровых сушильных частей бумагоделательных машин содержат промежуточный (паразитный) шестеренный привод, который передает вращение и крутящие моменты от приводной шестерни к шестерням сушильных цилиндров группы. Одновременно с шестеренным приводом сушильные сетки, получая вращение от сушильных цилиндров, приводят во вращение сетководящие валы. Таким образом, в сушильных частях применяют две последовательно работающих передачи, шестеренную для вращения сушильных цилиндров и сеточную — для вращения сетководящих валов. Широкое применение синтетических сушильных сеток позволяет отказаться от паразитного шестеренного привода, заменив его сеточным. Замена паразитного шестеренного привода сеточным значительно сокращает количество зубчатых передач и снижает энергоемкость приводов. В работе исследовано влияние изменения длины сетки сушильной части бумагоделательной машины от температуры, времени и силы нагружения сетки. Рассмотрены свойства синтетических сеток, в том числе данные о допустимой нагрузке сеток. Показан расчет перехода из размеров натуральной сетки к модели-образцу. Для эксперимента приведены расчет необходимых времени, температуры и нагружения в соответствии с натуральными режимами работы сеточной части бумагоделательной машины. Проведен статистический анализ обработки полученных данных. Выполнен пересчет данных экспериментальной модели к натуральной сетке. Как отмечено в выводах, переход от экспериментальных данных увеличения длин l_{\min} и l_{\max} к увеличению длины сетки сушильной части выполнен с применением передаточной функции, включающей масштабы подобия. Получены следующие предельные значения увеличения длины сетки сушильной части: $L_{\min} = 1288 \text{ мм} = 1,288 \text{ м}$; $L_{\max} = 2014 \text{ мм} = 2,014 \text{ м}$. Перемещение сетконатяжного вала для начального натяжения равно 2,07 м, а относительное начальное удлинение сетки составляет 6,7 %.

Ключевые слова: сушильная часть; сушильная сетка; трехфакторный эксперимент; изменение длины; влияние температуры; влияние нагружения.

Dependence of the initial tension of the mesh of the drying part of a paper-making machine on operating mode factors

V.P. Sivakov^a, N.V. Kutsubina^b, S.N. Isakov^c, A.V. Vurasko^d, K.S. Isaeva^e

Ural State Forestry Engineering University; 37, Sibirsky Trakt St., Ekaterinburg, Russia

^a sivakovvp@m.usfeu.ru, ^b nelly3416@mail.ru, ^c isakovsn@m.usfeu.ru,

^d vuraskoav@m.usfeu.ru, ^e isaeva.kseniya.98@mail.ru

^a <https://orcid.org/0000-0002-9387-1512>, ^b <https://orcid.org/0000-0002-0438-406X>, ^c <https://orcid.org/0009-0008-6236-6661>,

^d <https://orcid.org/0000-0002-9471-085X>, ^e <https://orcid.org/0000-0003-1506-1036>

Received 12.04.2024, accepted 15.05.2024

The drives of the multi-cylinder drying parts of papermaking machines contain an intermediate (parasitic) gear drive, which transmits rotation and torques from the drive gear to the gears of the drying cylinders of the group. Simultaneously with the gear drive, the drying grids, receiving rotation from the drying cylinders, rotate the grid shafts. Thus, two sequentially operating drives are used in the drying parts, a gear drive for rotating the drying cylinders and a grid drive for rotating the grid shafts. The widespread use of synthetic drying nets makes it possible to abandon the parasitic gear drive by replacing it with a mesh one. Replacing a parasitic gear drive with a grid drive significantly reduces the number of gears and reduces the energy consumption of the drives. The article investigates the effect of changes in the length of the mesh of the drying part of the paper machine on the temperature, time and loading force of the mesh. The properties of synthetic grids, including data on the permissible load of grids, are considered. The calculation of the transition from the dimensions of the natural mesh to the sample model is shown. For the experiment, the calculation of the required time, temperature and loading is given in accordance with the full-scale operating modes of the grid part of the paper machine. A statistical analysis of the processing of the received data is carried out. It is noted in the conclusions: the transition from experimental data on increasing the lengths l_{\min} and l_{\max} to increasing the length of the grid of the drying part is performed using a transfer function that includes similarity scales. The following limit values for increasing the length of the mesh of the drying part are obtained: $L_{\min} = 1288 \text{ m} = 1,288 \text{ m}$;

$L_{\max} = 2014 \text{ mm} = 2,014 \text{ m}$. The displacement of the tensioning shaft for the initial tension is 0.2 m, and the relative initial elongation of the mesh is 6.7%.

Keywords: drying part; drying grid; three-factor experiment; length change temperature effect; loading effect.

Введение. В бумагоделательном производстве периодически выполняются работы по совершенствованию и внедрению приводов технологического оборудования [1–3], а также по энергосбережению [4–6]. Приводы многоцилиндровых сушильных частей бумагоделательных машин содержат промежуточный (паразитный) шестеренный привод, который передает вращение и крутящие моменты от приводной шестерни к шестерням сушильных цилиндров группы. Одновременно с шестеренным приводом сушильные сетки, получая вращение от сушильных цилиндров, приводят во вращение сетководящие валы. Таким образом, в сушильных частях применяют два последовательно работающих привода, шестеренный для вращения сушильных цилиндров и сеточный для вращения сетководящих валов. Широкое применение синтетических сушильных сеток позволяет отказаться от паразитного шестеренного привода, заменив его сеточным. Замена паразитного шестеренного привода сеточным значительно сокращает количество зубчатых передач и снижает энергоемкость приводов.

Сетки сушильной части (ССЧ) обладают хорошей воздухопроницаемостью, длительным периодом эксплуатации и обеспечивают лучшее натяжение по сравнению с сушильными сукнами. Синтетические ССЧ применяют не только для технологического прижатия

полотна бумаги к нагретой поверхности сушильного цилиндра (СЦ), но также и в качестве приводных плоскоременных передач для вращения СЦ и сетководящих валов.

В режиме плоскоременных приводов синтетические ССЧ применяют на Сухонском ЦБК, Окуловской БФ и других предприятиях. Применение синтетических ССЧ как плоскоременных передач позволяет демонтировать паразитный привод, снизить шум и вибрацию, сократить расход смазки привода сушильной части (СЧ). Замена паразитного привода синтетическими ССЧ по указанным показателям актуальна для большинства СЧ бумаго- и картоноделательных машин по условиям энергосбережения и энергоэффективности [7–10].

Применение ССЧ в качестве плоскоременных приводов СЦ и сетководящих валов сдерживается ограниченными данными по увеличению длины ССЧ при натяжении в процессе эксплуатации [11; 12].

В статье представлены данные по изучению изменения длины ССЧ в режиме полного факторного эксперимента.

Привод БМ. Сетка СЧ. Для построения плана эксперимента проведем анализ характеристик ССЧ [13]. В табл. 1 представлены сравнительные характеристики сушильных сеток, сукон и их материала [14; 15].

Таблица 1. Технические характеристики сушильных сеток и сукон

Марка и характеристики материалов сушильных сеток	Масса, г/м ²	Натяжение, Н/см	Воздухопроницаемость, см ³ /(см ² ·с)
СК. Основа — полиэфирная нить с полиамидным покрытием. Уток — монопить	1 064	25	382
СК-2. Основа — полиэфирная нить с полиамидным покрытием. Уток — монопить	1 464		110
СК-3. Основа — полиэфирная нить с полиамидным покрытием. Уток 1 — полиэфирная нить. Уток 2 — монопить	1 218		154
СК-4. Основа — комплексная акриловая нить. Уток — монопить	1 236		346
СК-5. Основа — комплексная акриловая нить с пропиткой. Уток — монопить с немаркирующим натронным слоем	1 218		184
СМ-1. Сетки полностью изготовлены из монопить	1 150		305
Сушильное сукно шерстяное с добавкой синтетических волокон	3 500	15–20	2,04–11,60
Сушильное сукно из хлопка и асбестового волокна	1 800–1 900	5	1,56–4,10

Цель эксперимента заключается в разработке и апробировании метода экспериментального исследования увеличения длины сетки сушильной части (ССЧ) от факторов эксплуатации.

Задачи эксперимента.

1. Подготовка эксперимента.
2. Обоснование размеров, характеристик и факторов, действующих на образцы сушильной сетки (ОСС).
3. Планирование экспериментального исследования и обработка данных эксперимента.

4. Пересчет экспериментальных данных увеличения длины ОСС в увеличение длины ССЧ.

Подготовка эксперимента. Размер сетки сушильной части бумагоделательной машины: длина $L = 31\,000$ мм, ширина $B = 3\,000$ мм.

Длину растяжения (l_n) ОСС принимаем по установочной базе разрывной машины МР-05, равной $l = 155$ мм. Но, с учетом зажимной части установки, необходимо прибавить 35 мм к полученному. Образцы изготавливаем длиной 190 мм.

Принимаем, что увеличение длины ССЧ при эксплуатации происходит от действия следующих основных факторов: силы натяжения F , H ; времени наработки τ , мин; и рабочей температуры T , °C.

Размер ССЧ бумагоделательной машины: длина $L = 31\,000$ мм, ширина $B = 3\,000$ мм. ОСС и ССЧ изготовлены из материала марки СК-4, табл. 1.

В эксперименте применены следующее оборудование и измерительные приборы:

- разрывная машина МР-05 (рис. 1);
- производственный фен РИТ РНГ 2001-С;
- секундомер, штангенциркуль *Micron* ШЦК-1-150 0.02.



Рис. 1. Разрывная машина МР-0,5

Обоснование размеров и характеристик ОСС. Масштаб подобия ширины (b) ОСС и ширины (B) ССЧ определим из пропорции (1):

$$\frac{\Delta b}{b} = \frac{\Delta B}{B} \text{ или } \frac{B}{b} = \frac{\Delta B}{\Delta b}, \quad (1)$$

где Δb и ΔB — размеры уменьшения начальной ширины в средней части длин ОСС и ССЧ соответственно.

Масштаб подобия ширины ССЧ и ОСС:

$$\pi_b = \frac{B}{b} = \frac{3000}{30} = 100. \quad (2)$$

Масштаб подобия длины (l_n) ОСС и длины (L) ССЧ определяем из пропорции:

$$\frac{l}{l_n} = \frac{\Delta L}{L} \text{ или } \frac{L}{l_n} = \frac{\Delta L}{\Delta l}, \quad (3)$$

где l и ΔL — размеры увеличения начальных длин ОСС и ССЧ соответственно; l_n — начальная длина образца, мм.

Масштаб подобия длины ССЧ и ОСС из (4):

$$\pi_l = \frac{L}{l_n} = \frac{31000}{155} = 200. \quad (4)$$

Обоснование пределов изменения сил F , f , T в трехфакторном эксперименте.

Предельные максимальная F_{max} и минимальная F_{min} силы линейного натяжения ССЧ, работающих в режиме приводных плоскоремённых передач, ориентировочно определены расчетом [16] и равны $q_{max} = 15$ Н/см, $q_{min} = 5,7$ Н/см.

Определим запас линейного натяжения ССЧ из материала марки СК-4 относительно допустимого значения (табл. 1):

$$n_s = \frac{q_g}{q_i}, q_i \in [q_{max}, q_{min}], \quad (5)$$

где $q_g = 25$ Н/см — допустимое линейное натяжение ССЧ (табл. 1):

$$n_{smax} = \frac{25}{5,7} = 4,38$$

$$n_{smin} = \frac{25}{15} = 1,67$$

Рассчитанные по [16] линейные натяжения ССЧ удовлетворяют допустимому значению линейного натяжения материала сетки.

Допустимые силы натяжения ССЧ определяем по формуле:

$$|F_i| = q_i \cdot B, \text{ Н}, \quad (6)$$

где B — расчетная ширина ССЧ, 300 см.

Максимальная и минимальная допустимые силы натяжения по формуле (6) будут равны:

$$|F_{max}| = q_{max} \cdot B = 15 \cdot 300 = 4500 \text{ Н};$$

$$|F_{min}| = q_{min} \cdot B = 5,7 \cdot 300 = 1710 \text{ Н}.$$

Максимальную f_{max} и минимальную f_{min} силы натяжения ОСС определяем из пропорции:

$$\frac{f}{b} = \frac{F}{B} \text{ или } \frac{F}{f} = \frac{B_p}{b}. \quad (7)$$

Масштаб подобия сил натяжения ССЧ и ОСС:

$$\pi_f = \frac{B}{b} = \frac{300}{3} = 100. \quad (8)$$

Из (8) определяем силы f_{max} и f_{min} :

$$f_{max} = \frac{F_{max}}{\pi_f} = \frac{4500}{100} = 45 \text{ Н};$$

$$f_{min} = \frac{F_{min}}{\pi_f} = \frac{1710}{100} = 17 \text{ Н}.$$

Определение пределов изменения температур при нагревании ОСС. Сушильная часть бумагоделательной машины оборудована закрытым теплоизоляционным колпаком. Температурный режим работы сушильной части исследован в [17; 18]. Установлено, что температура сеток на уровне фундаментальных шин равна $T_n = (30-45)$ °C, а на уровне верхних сушильных цилиндров — $T_o = (65-95)$ °C.

Для экспериментальных исследований принимаем нижнее значение температуры ОСС равным $t_n = 40$ °С, верхнее — $t_6 = 80$ °С. Масштаб подобия по температуре нагревания образцов определяем по верхним значениям температур из пропорции:

$$\frac{T_{\max}}{\Delta T_e} = \frac{t_{\max}}{\Delta t} \quad \text{или} \quad \frac{T_{\max}}{t_{\max}} = \frac{\Delta T_e}{\Delta t}, \quad (9)$$

где $\Delta T_e = (95-65)$ °С = 30 °С — интервал изменения температуры ССЧ на уровне верхних сушильных цилиндров; $\Delta t = (82,5-77,5)$ °С = 5 °С — интервал отклонения верхнего значения температуры ОСС от среднего в экспериментах.

Масштаб подобия по температуре определим по формуле (10):

$$\pi_t = \frac{\Delta T_e}{\Delta t} = \frac{30}{5} = 6 \quad (10)$$

Обоснование пределов изменения времени в эксперименте. В работающем сеточном приводе сушильных цилиндров и сетководущих валов разность сил натяжения ведомой ветви (F_2) и ведущей ветви (F_1) приводного вала растягивает (увеличивает длину) ведущей ветви и уменьшает длину ведомой ветви на ΔL [18].

Увеличение длины ССЧ на $+\Delta L$ (рис. 2) происходит на дугах упругого скольжения приводного вала, СЦ и сетководущих валов охватываемых ведущей ветвью. Уменьшение длины ССЧ на $-\Delta L$ происходит на ведомой ветви ССЧ (см. рис. 2). Вследствие неоднородности материала, а также упругого скольжения ССЧ по охватываемым поверхностям приводного вала, сушильных цилиндров и сетководущих валов, установление постоянного и равномерного натяжения ведущей ветви ССЧ занимает больший период времени в сравнении с периодом натяжения ОСС.

Для установления равномерного линейного натяжения новую ССЧ обкатывают на вспомогательной скорости. В период обкатки за счет упругого скольжения ССЧ по поверхности приводного вала СЦ и сукководущих валов по поверхности приводного вала происходит установление равномерного постоянного линейного натяжения по длине и ширине сетки.

Период времени обкатки зависит от окружной силы F_t на приводном валу сетки. Например, при $F_{t \min} = 1,71$ кН период обкатки ССЧ $T = 34$ мин, а при $F_{t \max} = 4,5$ кН период $T = 67$ мин. Время выдержки ОСС под нагрузкой определяем с учетом его длины $l = 0,155$ м и длины дуги обхвата сушильной сеткой приводного вала. При диаметре $d = 0,6$ м и угле обхвата, равном 200°, длина дуги обхвата $L = 1,024$ м.

Масштаб подобия времени натяжения ССЧ и ОСС под нагрузкой определяем из пропорции:

$$\frac{T}{L} = \frac{\tau}{l} \quad \text{или} \quad \frac{T}{\tau} = \frac{L}{l}. \quad (11)$$

Масштаб подобия времени натяжения ССЧ и ОСС определяем из пропорции:

$$\pi_r = \frac{L}{l} = \frac{1,024}{0,155} = 6,61. \quad (12)$$

Минимальное и максимальное натяжения ОСС по (11):

$$\tau_{\min} = \frac{T_{\min}}{\pi_r} = \frac{34}{6,61} = 5,14 \square 5 \text{ мин};$$

$$\tau_{\max} = \frac{T_{\max}}{\pi_r} = \frac{67}{6,61} = 10,13 \square 10 \text{ мин}.$$

Экспериментальные исследования и обработка данных эксперимента. Увеличение длины (l_i) образцов сетки от продольного растяжения исследовано в эксперименте при варьировании трех факторов в следующих уровнях: силы Z_1 в диапазоне 17...45 Н; времени Z_2 в диапазоне 5...10 мин (времени выдержки образца под действием силы и температуры); температуры нагревания образца Z_3 в диапазоне 40...80 °С.

В данном трехфакторном эксперименте применено трехкратное равномерное дублирование исследуемых образцов. В матрицу планирования вписаны цифровые средние арифметические значения \bar{l}_i увеличения длины образцов, исследованных по плану j -х строк матрицы, рассчитанных по формуле:

$$\bar{l}_j = \frac{1}{n} \sum_{n=1}^n l_{jn}, \quad j \in \overline{1,2,\dots,8}, \quad (13)$$

где $n = 3$ — число параллельных экспериментов; $u = \overline{1,2,3}$ — номера параллельных экспериментов.

Матрица планирования эксперимента приведена в табл. 2.

Таблица 2. Матрица планирования эксперимента для l_i

Номер опыта	X_0	X_1	X_2	X_3	$Z_1, \text{ Н}$	$Z_2, \text{ мин}$	$Z_3, \text{ °С}$	$l, \text{ мм}$
1	1	-1	-1	-1	17	5	40	0,2
2	1	1	-1	-1	45	5	40	0,31
3	1	-1	1	-1	17	10	40	0,06
4	1	1	1	-1	45	10	40	0,06
5	1	-1	-1	1	17	5	80	0,4
6	1	1	-1	1	45	5	80	0,2
7	1	-1	1	1	17	10	80	0,15
8	1	1	1	1	45	10	80	0,4

Уравнение линейной регрессии, рассчитанное по [19], имеет вид:

$$l = b_0 + x_1 b_1 + x_2 b_2 + x_3 b_3. \quad (14)$$

Для каждой матрицы строки полного факторного эксперимента вычисляем статистическую дисперсию эксперимента S_j^2 по данным n -параллельных опытов:

$$S_j^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{n=1}^n (l_{jn} - \bar{l}_j)^2. \quad (15)$$

Ошибка дисперсии S_j^2 эксперимента определяем по формуле:

$$S_j = \sqrt{S_j^2}. \quad (16)$$

По формулам (15) и (16) проведены расчеты статистической дисперсии S_j^2 и ошибки дисперсии S_j , результаты представлены в табл. 3.

Для проверки сомнительных, т. е. резко выделяющихся результатов применяем t -критерий Стьюдента [12]:

$$t_p = \left| \bar{l} - \bar{l}_i^* \right| / S, \quad (17)$$

где t_p — расчетный критерий Стьюдента [19]; \bar{l}, \bar{l}_i^* — среднее арифметическое и проверяемое на грубую ошибку l_i значения; S — среднее квадратическое отклонение удлинения образцов.

Таблица 3. Результаты расчета дисперсии

Строка, j_i	Статистическая дисперсия, S_j^2	Ошибка дисперсии S_j
j_1	$S_1^2 = 0,0157$	$S_1 = 0,125$
j_2	$S_2^2 = 0,0301$	$S_2 = 0,173$
j_3	$S_3^2 = 0,0058$	$S_3 = 0,076$
j_4	$S_4^2 = 0,0380$	$S_4 = 0,194$
j_5	$S_5^2 = 0,0086$	$S_5 = 0,093$
j_6	$S_6^2 = 0,0826$	$S_6 = 0,287$
j_7	$S_7^2 = 0,0057$	$S_7 = 0,075$
j_8	$S_8^2 = 0,0366$	$S_8 = 0,191$
Сумма	$\sum_{j=1}^8 S_j^2 = 0,2231$	—

Табличные значения t -критерия Стьюдента выбираем из справочных таблиц [12], при $p = 0,95$ и $f = 24$ имеем $t = 2,06$.

Произведена проверка крайних значений (минимальных и максимальных).

Минимальное значение увеличения длины образца $l_{17}^* = 0,06$ мм. Проверяем t_{17}^* по формуле (17):

$$t_{17}^* = |0,33 - 0,06| / 0,447 = 0,72$$

$$t_{17}^* = 0,72 < t = 2,06$$

Максимальное значение удлинения длины образца $l_6 = 0,92$ мм. Проверяем t_6^* по формуле (17):

$$t_6^* = |0,33 - 0,92| / 0,447 = 1,31$$

$$t_6^* = 1,31 < t = 2,06$$

Проверяемые крайние значения увеличения длины образцов l_6, l_{17} не превышают t -критерий Стьюдента и удовлетворяют условиям эксперимента.

В данном эксперименте применено трехкратное равномерное дублирование исследуемых образцов. При равномерном дублировании экспериментов однородность дисперсий проверяем по критерию Кохрена [19]:

$$G_p = \frac{S_{j_{\max}}^2}{\sum_{j=1}^n S_j^2}. \quad (18)$$

В данном эксперименте $S_{\max}^2 = S_6^2 = 0,0826$, а $\sum_{j=1}^n S_j^2 = 0,2231$, тогда:

$$G_p = \frac{0,0826}{0,2231} = 0,37.$$

Табличное значение критерия Кохрена по [19] равно $G_T = 0,391$.

Из сравнения следует, что $G_p = 0,37 < G_T = 0,391$, если $G_p \leq G_T$, то дисперсии однородны.

Для однородных дисперсий S_j^2 эксперимента дисперсию воспроизводимости S_i^2 вычисляем по формуле:

$$S_i^2 = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N S_j^2, \quad (19)$$

где $N = 8$ — число строк матрицы планирования.

После подстановки значений S_j^2 получаем:

$$S_i^2 = \frac{1}{8} 0,2231 = 0,028.$$

Для определения эффектов парных и тройного взаимодействия факторов составляем расширенную матрицу планирования, из решения которой получаем следующее уравнение:

$$y = b_0 + x_1 b_1 + x_2 b_2 + x_3 b_3 + b_{12} x_1 x_2 + b_{13} x_1 x_3 + b_{23} x_2 x_3 + b_{123} x_1 x_2 x_3. \quad (20)$$

Производим проверку значимости коэффициентов парных и тройного взаимодействий уравнения линейной регрессии (20). Некоторые коэффициенты (b_{ij}) могут оказаться пренебрежительно малыми — незначительными, чтобы установить, значим коэффициент $|b_{ij}|$ или не значим, производим их сравнение с доверительным интервалом равным $S_i^2 \cdot t$.

Доверительный интервал вычисляем по формуле:

$$S_i^2 \cdot t = 0,028 \cdot 2,06 = 0,058, \quad (21)$$

где $S_i^2 = 0,028$ — дисперсия воспроизводимости.

Следующие коэффициенты уравнения линейной регрессии являются пренебрежительно малыми:

$$b_{12} = |-0,05| < |b_{ij}| = 0,058;$$

$$b_{13} = 0,0525 < |b_{ij}| = 0,058;$$

$$b_{123} = |-0,0475| < |b_{ij}| = 0,058.$$

Производим сокращение членов уравнения линейной регрессии (20) с пренебрежительно малыми коэффициентами и представляем его в виде:

$$l_1 = 0,35 + 0,095x_1 + 0,03x_2 + 0,098x_3 - 0,075x_2x_3. \quad (22)$$

Производим проверку адекватности уравнения (22) по остаточной дисперсии. Остаточная дисперсия характеризует рассеяние экспериментальных значений (l_1^o) относительно расчетных (l_1^p). Остаточную дисперсию (дисперсию адекватности) определяем по формуле:

$$S_{ao}^2 = \frac{1}{N-B} \sum_{i=1}^N (l_i^o - l_i^p)^2, \quad (23)$$

где $B = 5$ — число членов уравнения линейной регрессии (17).

Определим расчетные значения l_i^p , мм, по уравнению (22):

$$l_{11}^p = 0,35 - 0,095 - 0,03 - 0,0975 - 0,075 = 0,0525$$

$$l_{12}^p = 0,35 + 0,095 - 0,03 - 0,0975 + 0,075 = 0,2625$$

$$l_{13}^p = 0,35 - 0,095 + 0,03 - 0,0975 - 0,075 = 0,1125$$

$$l_{14}^p = 0,35 + 0,095 + 0,03 - 0,0975 + 0,075 = 0,4525$$

$$l_{15}^p = 0,35 - 0,095 - 0,03 + 0,0975 + 0,075 = 0,3975$$

$$l_{16}^p = 0,35 + 0,095 - 0,03 + 0,0975 - 0,075 = 0,4375$$

$$l_{17}^p = 0,35 - 0,095 + 0,03 + 0,0975 + 0,075 = 0,4575$$

$$l_{18}^p = 0,35 + 0,095 + 0,03 + 0,0975 - 0,075 = 0,4975$$

Определим значения $(l^o - l^p)^2$:

$$(l_1^o - l_1^p)^2 = (0,19 + 0,0525)^2 = 0,019$$

$$(l_{12}^o - l_{12}^p)^2 = (0,28 + 0,2625)^2 = 0,0003$$

$$(l_{13}^o - l_{13}^p)^2 = (0,24 + 0,1125)^2 = 0,0163$$

$$(l_{14}^o - l_{14}^p)^2 = (0,32 + 0,4525)^2 = 0,0176$$

$$(l_{15}^o - l_{15}^p)^2 = (0,17 + 0,3975)^2 = 0,0516$$

$$(l_{16}^o - l_{16}^p)^2 = (0,66 + 0,4325)^2 = 0,0495$$

$$(l_{17}^o - l_{17}^p)^2 = (0,44 + 0,4575)^2 = 0,0003$$

$$(l_{18}^o - l_{18}^p)^2 = (0,54 + 0,4975)^2 = 0,0018$$

После подстановки значений в (23) имеем:

$$S_{ao}^2 = \frac{1}{8-5} 0,162 = 0,054.$$

Расчетный критерий Фишера определяем по формуле:

$$F_p = \frac{S_{ao}^2}{S_e^2} = \frac{0,054}{0,028} = 1,93. \quad (24)$$

Выбираем табличное значение критерия при следующих данных [19]: доверительной вероятности $P = 0,95$; числе степеней свободы большей дисперсии адекватности $f_1 = 5$; числе степеней свободы меньшей дисперсии воспроизводимости $f_2 = 8$ из [19] имеем $F_T = 2,73$. Проверим адекватность уравнения регрессии (22).

Уравнение регрессии удовлетворительно характеризует функцию y_l при условии:

$$F_p = 1,93 \leq F_T = 2,73. \quad (25)$$

Следовательно, уравнение (22) адекватно определяет зависимость y_l от факторов X_1, X_2, X_3 .

Определение увеличения длины ССЧ по экспериментальным данным увеличения длины ОСС. Из расчетных данных уравнения (22) установлено, что минимальное увеличение длины ОСС получено по сочетанию факторов для первой строки матрицы $l_{11}^p = 0,0525$ мм, а максимальное — для 8-й строки матрицы $l_{18}^p = 0,4975$ мм. Выполним переход от экспериментальных данных увеличения длин ОСС к увеличению длины ССЧ.

Передаточную функцию от увеличения длины ОСС к увеличению длины ССЧ запишем в виде [19]:

$$\Delta L = \pi_f \cdot \pi_i \cdot \pi_r \cdot l_i^p, l_{ij} \in l_{11}, l_{18}. \quad (26)$$

Минимальное увеличение длины ССЧ по (26):

$$\Delta L = \pi_f \cdot \pi_i \cdot \pi_r \cdot l_{11}^p = 100 \cdot 6 \cdot 6,75 \cdot 0,0525 = 1288 \text{ мм.}$$

Максимальное увеличение длины ССЧ по (26):

$$\Delta L = \pi_f \cdot \pi_i \cdot \pi_r \cdot l_{18}^p = 100 \cdot 6 \cdot 6,75 \cdot 0,4975 = 2014 \text{ мм.}$$

Увеличение длины ведущей ветви ССЧ происходит на всех сушильных цилиндрах и сетководущих валах из-за упругости скольжения. Минимальное увеличение длины ССЧ происходит на последнем сетководущем валу, поз. 7 рис. 2, на ведущей ветви и достигает максимального увеличения длины на ПСВ.

Начальный ход вала натяжного устройства. Окружная сила на приводном валу F_3 по формуле (6) изменяется в пределах 1,7...4,5 кН. Принимаем F_3 равную 3 400 Н.

Начальное линейное натяжение ССЧ $l_0 = 12,0$ Н/см. для максимальной силы натяжения.

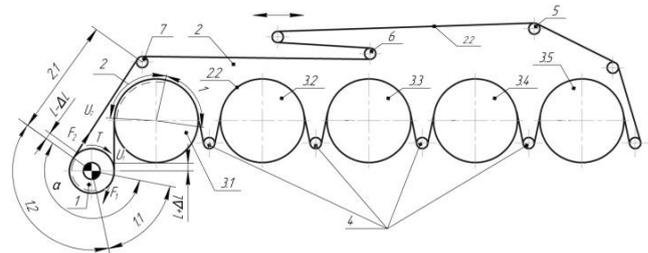


Рис. 2. Схема к обоснованию кинематических характеристик, сил и диаметра приводного сетководущего вала сеточного привода верхних сеток: 1 — приводной сетководущий вал; 2 — ССЧ; 2.1 — ведомая ветвь сетки; 2.2 — ведущая ветвь сетки; 3.1, 3.2, ... 3.5 — сушильные цилиндры; 4 — сетководущие валы; 5 — сеткоправочный вал; 6 — сетконатяжной вал

Принимаем силу начального натяжения в одной ветви ССЧ:

$$F_0 = l_0 \cdot B = 12 \cdot 300 = 3600 \text{ Н.} \quad (27)$$

Сила начального линейного натяжения на сетконатяжном валу, поз. 6 рис. 2, ССЧ:

$$F_H = 2F_0 = 2 \cdot 3600 = 7200 \text{ Н.} \quad (28)$$

Максимальная сила натяжения ведущей ветви приводной ССЧ [20]:

$$F_1 = \frac{F_H}{2} + F_3 = \frac{7200}{2} + 3400 = 7000 \text{ Н,} \quad (29)$$

где F_3 — 3 400 Н принятая сила натяжения.

Допустимая (по пределу упругости ССЧ) сила натяжения:

$$|F| = q_{\max} \cdot L = 25 \cdot 300 = 7500 \text{ Н} = 7,5 \text{ кН}, \quad (30)$$

следовательно, $F_1 \leq |F|$ допустимого.

Минимальная сила натяжения ведущей ветви приводной ССЧ [20]:

$$F_2 = \frac{F_H}{2} - F_3 = \frac{7200}{2} - 3400 = 200 \text{ Н.} \quad (31)$$

Максимальное увеличение длины ССЧ от начального натяжения:

$$\Delta l_{\max} = \frac{F_1 \cdot \Delta l_{\max}}{F_3} = \frac{7000 \cdot 2,014}{3400} = 4,146 \text{ м} \quad (32)$$

Минимальное увеличение длины ССЧ от начального натяжения:

$$\Delta l_{\min} = \frac{F_2 \cdot \Delta l_{\min}}{F_3} = \frac{200 \cdot 1,288}{3400} = 0,08 \text{ м,} \quad (32)$$

где Δl_{\max} и Δl_{\min} — максимальное и минимальное соответственно увеличение длины сетки, определенное экспериментально.

Определяем перемещение сетконатяжного вала.

Для начального натяжения ССЧ перед работой сушильной части на скорости 440–480 м/мин следует увеличить длину ССЧ на Δl_{\max} перемещением

сетконатяжного вала (поз. 6, рис. 2) не менее чем на $0,5\Delta l_{\max} = 2,07 \text{ м}$ [16].

Для ССЧ длиной $L = 31 \text{ м}$ относительное начальное удлинение составит:

$$\Delta l_{0n} = \frac{0,5\Delta l_{\max}}{L} = \frac{2,07}{31} = 0,067, \text{ или } 6,7 \% \quad (33)$$

Отметим, что за период работы ССЧ удлиняется до 18 % [16].

Выводы

1. Для изучения увеличения длины от начального натяжения ССЧ (от действия силы натяжения, температуры и времени натяжения) выполнен трехфакторный эксперимент. Геометрические размеры ОСС (длина и ширина) и факторов режима эксплуатации (сил F , температур t и времени τ относительно ССЧ и режимов сушки бумаги) определены с применением масштабов подобия.

2. Установлено, что изменение длины ОСС от действия факторов F , t и τ в трехфакторном эксперименте описывается линейным уравнением:

$$l_i = 0,35 + 0,095x_1 + 0,03x_2 + 0,098x_3 - 0,075x_2x_3.$$

Отметим, что из всех факторов минимальное влияние на изменение длины оказывает диапазон температуры.

3. Расчетные предельные значения увеличения длины ОСС:

$$l_{\min} = 0,0525 \text{ мм}; l_{\max} = 0,4975 \text{ мм.}$$

4. Переход от экспериментальных данных увеличения длин l_{\min} и l_{\max} к увеличению длины ССЧ выполнен с применением передаточной функции, включающей масштабы подобия. Получены следующие предельные значения увеличения длины ССЧ: $L_{\min} = 1288 \text{ мм} = 1,288 \text{ м}$; $L_{\max} = 2014 \text{ мм} = 2,014 \text{ м}$.

5. Начальное линейное натяжение сетки, обеспечиваемое перемещением сетконатяжного вала, поз. 6 рис. 2, равно 2,07 м. Относительное начальное удлинение сетки составляет 6,7 %.

Литература

1. Salo J. The attraction of simplicity: Permanent magnet machines are here to stay // ABB Review. 2009. № 2. P. 29-34.
2. Naikola M. No gears required // ABB Review. 2009. № 4. P. 12-15.
3. Байзигель Д. Voith Drive - маленький да удаленький: новый привод для повышения рентабельности производства бумаги // Together. 2006. № 21. P. 32-33.
4. Chernaya N.V., Fleisher V.L., Bogdanovich N.I. Reduction of Energy Consumption of Paper and Cardboard Machines in Production of Glued Paper and Cardboard // Изв. высш. учеб. заведений. Лесной журнал. 2019. № 5. С. 188-193.
5. Chen X., Man Y., Zheng Q., Hu Y., Li J., Hong M. Industrial verification of energy saving for the single-tier cylinder based paper drying process // Energy. 2019. № 170. P. 261-272.
6. Li J., Kong L., Liu H. Dryer section energy system measurement and energy-saving potential analysis for a paper machine // Meas. Control. 2012. № 45. P. 239-243.
7. Chen X., Li J., Liu H., Yin Y., Hong M., Zeng Z. Energy system diagnosis of paper-drying process. Part 1: Energy performance assessment // Dry. Technol. 2015. № 34. P. 930-943.
8. Chen X., Li J., Liu H., Yin Y., Zhang Y. Energy system diagnosis of paper-drying process. Part 2: A model-based estimation of energy-saving potentials // Dry. Technol. 2015. № 34. P. 1219-1230.
9. Heikkilä P. A Study on the Drying Process of Pigment Coated Webs. Ph.D. Thesis, Åbo Akademi University, Turku, Finland, 1993.
10. Keränen J. Increasing the Drying Efficiency of Cylinder Drying. Ph.D. Thesis, University of Jyväskylä. Jyväskylä, Finland, 2011.
11. De Jong S., Postle R. An Energy Analysis of Woven-fabric Mechanics by Means of Optimal-control Theory. P.L Tensile Properties. P.II. Pure-bending Properties // Journal of Textile Institute. 1977. № 68. P. 350-369.
12. Jiew Poh Liew. Voith Drive - First IEM starts up at Perlen Papier AG I New plants in India // Together. 2011. № 32. P. 44-45.
13. Heo S.H., Cho H., Kim J.-K., Moon S.-J., Yeo Y.-K. Modeling and simulation of multi-cylinder paper drying processes // J. Chem. Eng. Jpn. 2011. № 44. P. 437-446.
14. Куров В.С., Кокушин Н.Н. Теория и конструкция машин и оборудования отрасли. Бумаго- и картоноделательные машины. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2006. 588 с.
15. Технология целлюлозно-бумажного производства. В 3 т. Производство бумаги и картона. Ч. 1 Технология производства и обработки бумаги и картона / отв. ред. П.С. Осипов. СПб.: Политехника, 2005. Т. II. 423 с.

16. Эйлин И.Я. Бумагоделательные и отделочные машины. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Гослесбумиздат, 1962. 687 с.
17. Сиваков В.П., Вураско А.В., Исаева К.С. Температурное диагностирование подшипников сушильных цилиндров картоноделательной машины // Изв. С.-Петерб. лесотехн. акад. 2022. Вып. 238. С. 185-202.
18. Сиваков В.П., Вураско А.В., Исаева К.С. Температурное диагностирование подшипников сушильных цилиндров картоноделательной машины // Молодые ученые в решении актуальных проблем науки: сб. материалов Всерос. науч.-практической конф. студентов, аспирантов и молодых ученых с междунар. участием (21-22 апр. 2022 г.). Красноярск, 2022. С. 185-202.
19. Сиваков В.П., Вураско А.В., Леонович А.А. Основы научных исследований в химической и механической переработке растительного сырья. Екатеринбург: УГЛТУ, 2021. 169 с.
20. Иванов М.Н. Детали машин. 5-е изд., перераб. М.: Высш. школа, 1991. 383 с.
7. Chen X., Li J., Liu H., Yin Y., Hong M., Zeng Z. Energy system diagnosis of paper-drying process. Part 1: Energy performance assessment // Dry. Technol. 2015. № 34. P. 930-943.
8. Chen X., Li J., Liu H., Yin Y., Zhang Y. Energy system diagnosis of paper-drying process. Part 2: A model-based estimation of energy-saving potentials // Dry. Technol. 2015. № 34. P. 1219-1230.
9. Heikkilä P. A Study on the Drying Process of Pigment Coated Webs. Ph.D. Thesis, Åbo Akademi University, Turku, Finland, 1993.
10. Keränen J. Increasing the Drying Efficiency of Cylinder Drying. Ph.D. Thesis, University of Jyväskylä. Jyväskylä, Finland, 2011.
11. De Jong S., Postle R. An Energy Analysis of Woven-fabric Mechanics by Means of Optimal-control Theory. P.L Tensile Properties. R.P. Pure-bending Properties // Journal of Textile Institute. 1977. № 68. P. 350-369.
12. Jiew Poh Liew. Voith Drive - First IEM starts up at Perlen Papier AG I New plants in India // Together. 2011. № 32. P. 44-45.
13. Heo C.H., Cho H., Kim J.-K., Moon S.-J., Yeo Y.-K. Modeling and simulation of multi-cylinder paper drying processes // J. Chem. Eng. Jpn. 2011. № 44. P. 437-446.
14. Kurov V.S., Kokushin N.N. Theory and design of machinery and equipment in the industry. Paper and cardboard machines. SPb.: Izd-vo Politekh. un-ta, 2006. 588 p.
15. Pulp and paper production technology. In 3 vols. V. II. Production of paper and cardboard. Part 1. Technology of production and processing of paper and cardboard / otv. red. P.S. Osipov. SPb.: Politekhnik, 2005. V. II. 423 p.
16. Ejlin I.Ya. Paper-making and finishing machines. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Гослесбумиздат, 1962. 687 с.
17. Sivakov V.P., Vurasko A.V., Isaeva K.S. Temperature diagnostics of bearings of drying cylinders of a cardboard machine // Izvestia SPbL-TA. 2022. Vyp. 238. P. 185-202.
18. Sivakov V.P., Vurasko A.V., Isaeva K.S. Temperature diagnostics of bearings of drying cylinders of a cardboard machine // Molodye uchenye v reshenii aktual'nyh problem nauki: sb. materialov Vseros. nauch.-prakticheskoy konf. studentov, aspirantov i molodyh uchenyh s mezhdunar. uchastiem (21-22 apr. 2022 g.). Krasnoyarsk, 2022. P. 185-202.
19. Sivakov V.P., Vurasko A.V., Leonovich A.A. Fundamentals of scientific research in chemical and mechanical processing of plant raw materials. Ekaterinburg: UGLTU, 2021. 169 p.
20. Ivanov M.N. Machine parts. 5-е изд., перераб. М.: Vyssh. shkola, 1991. 383 p.

References

1. Salo J. The attraction of simplicity: Permanent magnet machines are here to stay // ABB Review. 2009. № 2. P. 29-34.
2. Naikola M. No gears required // ABB Review. 2009. № 4. P. 12-15.
3. Bajzigel' D. Voith Drive - small and remote: a new drive to increase the profitability of paper production // Together. 2006. № 21. P. 32-33.
4. Chernaya N.V., Fleisher V.L., Bogdanovich N.I. Reduction of Energy Consumption of Paper and Cardboard Machines in Production of Glued Paper and Cardboard // Bulletin of higher educational institutions. Lesnoy zhurnal (Forestry journal). 2019. № 5. P. 188-193.
5. Chen X., Man Y., Zheng Q., Hu Y., Li J., Hong M. Industrial verification of energy saving for the single-tier cylinder based paper drying process // Energy. 2019. № 170. P. 261-272.
6. Li J., Kong L., Liu H. Dryer section energy system measurement and energy-saving potential analysis for a paper machine // Meas. Control. 2012. № 45. P. 239-243.