

НЕ РЕЦЕНЗИРОВАНО · NOT PEER-REVIEWED — препринт, опубликован до завершения рецензирования

УДК УДК 677.21.021.15

ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ СУШИЛЬНОГО АГЕНТА И ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ БАРАБАНА НА КИНЕТИКУ СУШКИ ХЛОПКА-СЫРЦА

Бутовский Петр Михайлович

Ташкентский институт текстильной и лёгкой промышленности

Бутовский Петр Михайлович: gtnz1071980@gmail.com

Аннотация. Аннотация. Сушка хлопка-сырца в барабанных сушилках остаётся одной из наиболее энергоёмких операций первичной обработки хлопка, а качество её проведения непосредственно влияет на прочность волокна, засорённость и выход продукции. Цель работы — установить количественную зависимость конечной влажности хлопка-сырца от температуры сушильного агента и частоты вращения барабана и подобрать кинетическую модель, пригодную для использования в системе автоматического управления сушилкой. Эксперименты выполнены на лабораторной барабанной установке по полному факторному плану 2^2 с трёхкратным повторением опытов. Начальная влажность хлопка-сырца составляла $14,0 \pm 0,3 \%$, температура сушильного агента изменялась от 110 до 150 °С, частота вращения барабана — от 8 до 12 мин⁻¹. Кинетические кривые аппроксимированы моделями Льюиса, Хендерсона — Пабиса и Пейджа; наилучшее согласие с опытными данными обеспечила модель Пейджа (коэффициент детерминации 0,989–0,994, среднеквадратичная ошибка не более 0,018). Получено уравнение регрессии, показывающее, что повышение температуры сушильного агента на 40 °С снижает конечную влажность в среднем на 1,7 процентного пункта, а увеличение частоты вращения барабана повышает её на 0,8 процентного пункта за счёт сокращения времени пребывания материала в барабане. Эффект взаимодействия факторов статистически незначим. Полученные зависимости позволяют рассчитывать уставки регулятора температуры по фактической влажности поступающего хлопка и тем самым уменьшить перегрев волокна и расход топлива.

Ключевые слова: хлопок-сырец, барабанная сушилка, кинетика сушки, модель Пейджа, влагоотношение, планирование эксперимента, автоматическое управление

Для цитирования: Бутовский П. М. ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ СУШИЛЬНОГО АГЕНТА И ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ БАРАБАНА НА КИНЕТИКУ СУШКИ ХЛОПКА-СЫРЦА // ARGO — научный журнал. — 2026. — URL: <https://www.robutpit.com/journal/article/1-vliianie-temperatury-sushilnogo-agenta-i-chastoty-vrashcheniia-barabana-na-kinet/>. (препринт, не рецензировано)

For citation: Бутовский, П. М. (2026). ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ СУШИЛЬНОГО АГЕНТА И ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ БАРАБАНА НА КИНЕТИКУ СУШКИ ХЛОПКА-СЫРЦА. ARGO Scientific Journal. <https://www.robutpit.com/journal/article/1-vliianie-temperatury-sushilnogo-agenta-i-chastoty-vrashcheniia-barabana-na-kinet/> [Preprint, not peer-reviewed]

Поступила: 26.09.2026

© Авторы, 2026. Статья распространяется по лицензии CC BY 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

УДК 677.21.021.15

ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ СУШИЛЬНОГО АГЕНТА И ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ БАРАБАНА НА КИНЕТИКУ СУШКИ ХЛОПКА-СЫРЦА**INFLUENCE OF DRYING AGENT TEMPERATURE AND DRUM ROTATION SPEED ON THE DRYING KINETICS OF RAW COTTON**

Аннотация. Сушка хлопка-сырца в барабанных сушилках остаётся одной из наиболее энергоёмких операций первичной обработки хлопка, а качество её проведения непосредственно влияет на прочность волокна, засорённость и выход продукции. Цель работы — установить количественную зависимость конечной влажности хлопка-сырца от температуры сушильного агента и частоты вращения барабана и подобрать кинетическую модель, пригодную для использования в системе автоматического управления сушилкой. Эксперименты выполнены на лабораторной барабанной установке по полному факторному плану 2^2 с трёхкратным повторением опытов. Начальная влажность хлопка-сырца составляла $14,0 \pm 0,3$ %, температура сушильного агента изменялась от 110 до 150 °C, частота вращения барабана — от 8 до 12 мин⁻¹. Кинетические кривые аппроксимированы моделями Льюиса, Хендерсона — Пабиса и Пейджа; наилучшее согласие с опытными данными обеспечила модель Пейджа (коэффициент детерминации 0,989–0,994, среднеквадратичная ошибка не более 0,018). Получено уравнение регрессии, показывающее, что повышение температуры сушильного агента на 40 °C снижает конечную влажность в среднем на 1,7 процентного пункта, а увеличение частоты вращения барабана повышает её на 0,8 процентного пункта за счёт сокращения времени пребывания материала в барабане. Эффект взаимодействия факторов статистически незначим. Полученные зависимости позволяют рассчитывать уставки регулятора температуры по фактической влажности поступающего хлопка и тем самым уменьшить перегрев волокна и расход топлива.

Ключевые слова: хлопок-сырец, барабанная сушилка, кинетика сушки, модель Пейджа, влагоотношение, планирование эксперимента, автоматическое управление.

Abstract. Drying of raw cotton in drum dryers remains one of the most energy-intensive operations of primary cotton processing, and its quality directly affects fibre strength, trash content and product yield. The aim of this work is to establish a quantitative relationship between the final moisture content of raw cotton, the drying agent temperature and the drum rotation speed, and to select a kinetic model suitable for use in an automatic dryer control system. The experiments were carried out on a laboratory drum dryer according to a full factorial 2^2 design with three replicates. The initial moisture content of raw cotton was 14.0 ± 0.3 %, the drying agent temperature varied from 110 to 150 °C and the drum speed from 8 to 12 rpm. The drying curves were fitted with the Lewis, Henderson–Pabis and Page models; the Page model gave the best agreement with the experimental data (coefficient of determination 0.989–0.994, root mean square error not exceeding 0.018). A regression equation was obtained showing that increasing the drying agent temperature by 40 °C reduces the final moisture content by 1.7 percentage points on average, while increasing the drum speed raises it by 0.8 percentage points because the residence time of the material in the drum becomes shorter. The interaction effect of the factors is statistically insignificant. The obtained relationships make it possible to calculate the set points of the temperature controller from the actual moisture content of incoming cotton and thus to reduce fibre overheating and fuel consumption.

Keywords: raw cotton, drum dryer, drying kinetics, Page model, moisture ratio, design of experiments, automatic control.

Введение

Хлопок-сырец, поступающий на хлопкоочистительные предприятия, характеризуется значительным разбросом влажности: в зависимости от сорта, сроков и способа уборки она колеблется от 8 до 20 % и более. Для нормальной работы очистительного и джинного оборудования влажность необходимо довести до 7–9 %, поэтому практически весь машинный сбор проходит через барабанные сушилки. Классическая теория сушки коллоидных капиллярно-пористых тел, изложенная в работах А. В. Лыкова [1] и А. С. Гинзбурга [2], описывает процесс как совокупность периода постоянной скорости и периода падающей скорости, причём для хлопка-сырца практически весь процесс протекает во втором периоде.

В мировой практике для инженерных расчётов применяют полуэмпирические тонкослойные модели. Модель Льюиса [3] рассматривает сушку как экспоненциальный процесс с одной константой, модель Хендерсона — Пабиса [4] вводит дополнительный коэффициент формы, а модель Пейджа [5] — показатель степени при времени, что позволяет учесть отклонение реальной кривой от экспоненты. Сравнительные обзоры [6, 7] показывают, что для волокнистых и зернистых материалов модель Пейджа, как правило, даёт наименьшую ошибку аппроксимации. Вопросы конструирования барабанных сушилок и расчёта времени пребывания материала рассмотрены в монографиях [8, 9].

Вместе с тем для хлопка-сырца в условиях барабанной сушилки с регулируемой частотой вращения данные о параметрах кинетических моделей в открытой литературе ограничены, а существующие системы управления, построенные на ПИД-регуляторах [10, 11], стабилизируют температуру сушильного агента без учёта фактической влажности материала. Это приводит либо к пересушиванию волокна при низкой входной влажности, либо к недосушиванию при высокой.

Цель работы — установить зависимость конечной влажности хлопка-сырца от температуры сушильного агента и частоты вращения барабана и подобрать кинетическую модель для последующего использования в адаптивной системе управления. Для достижения цели решались следующие задачи: получение кинетических кривых сушки при трёх уровнях температуры; сравнение моделей Льюиса, Хендерсона — Пабиса и Пейджа; построение регрессионной модели конечной влажности по результатам факторного эксперимента.

Материалы и методы

Объектом исследования служил хлопок-сырец средневолокнистого сорта машинного сбора второго промышленного сорта. Перед опытами материал увлажняли до начальной влажности $14,0 \pm 0,3$ % и выдерживали в герметичной таре 24 ч для равномерного распределения влаги. Влажность определяли термовесовым методом при 105 °C до постоянной массы с точностью взвешивания 0,01 г.

Сушку проводили на лабораторной барабанной установке с внутренним диаметром барабана 0,6 м и длиной 1,8 м, оснащённой лопастной насадкой. Температура сушильного агента задавалась электрическим калорифером и поддерживалась регулятором с точ-

ностью ± 2 °C; частота вращения барабана изменялась частотным преобразователем. Скорость сушильного агента во всех опытах составляла 1,5 м/с.

Кинетику сушки описывали безразмерным влагоотношением

$$MR = \frac{W - W_p}{W_0 - W_p} \quad (1)$$

где W — текущая влажность, %; W_0 — начальная влажность, %; W_p — равновесная влажность при данных условиях, %. Для аппроксимации опытных данных использовали модель Пейджа

$$MR = \exp(-k \cdot \tau^n) \quad (2)$$

где k — константа скорости сушки, мин^{-n} ; n — эмпирический показатель; τ — время сушки, мин. Параметры моделей находили нелинейным методом наименьших квадратов; качество аппроксимации оценивали по коэффициенту детерминации R^2 и среднеквадратичной ошибке RMSE.

Влияние факторов на конечную влажность исследовали по полному факторному плану 2^2 [12]. Факторы и их уровни: x_1 — температура сушильного агента (110 и 150 °C), x_2 — частота вращения барабана (8 и 12 мин^{-1}). Каждый опыт повторяли трижды в рандомизированном порядке. Модель искали в виде

$$W_k = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_{12} x_1 x_2 \quad (3)$$

где W_k — конечная влажность хлопка-сырца на выходе из барабана, %; x_1, x_2 — факторы в кодированном виде. Значимость коэффициентов проверяли по критерию Стьюдента, адекватность модели — по критерию Фишера при уровне значимости 0,05.

Результаты и обсуждение

Кинетические кривые сушки хлопка-сырца при частоте вращения барабана 10 мин^{-1} приведены на рис. 1. Во всём исследованном диапазоне процесс протекает в периоде падающей скорости, что согласуется с представлениями [1, с. 312]. Повышение температуры сушильного агента со 110 до 150 °C сокращает время достижения влагоотношения 0,5 примерно с 28 до 13 мин.

Результаты аппроксимации кривых тремя моделями показали, что модель Льюиса систематически завышает влагоотношение в начале процесса и занижает его в конце ($R^2 = 0,962$ – $0,975$). Модель Хендерсона — Пабиса даёт лучшие результаты ($R^2 = 0,971$ – $0,983$), однако наименьшую ошибку обеспечивает модель Пейджа, параметры которой приведены в табл. 1.

Таблица 1 — Параметры модели Пейджа для сушки хлопка-сырца

Температура, °C	$k, \text{мин}^{-n}$	n	R^2	RMSE
110	0,021	1,12	0,991	0,014
130	0,034	1,09	0,994	0,011
150	0,052	1,07	0,989	0,018

Константа скорости сушки k возрастает с температурой почти в 2,5 раза, тогда как показатель n меняется слабо и близок к единице. Зависимость k от абсолютной температуры удовлетворительно описывается уравнением аррениусовского типа, что позволяет интерполировать параметры модели внутри исследованного диапазона. Значения $n > 1$

указывают на некоторое ускорение сушки в начальный период, связанное с прогревом материала и удалением поверхностной влаги.

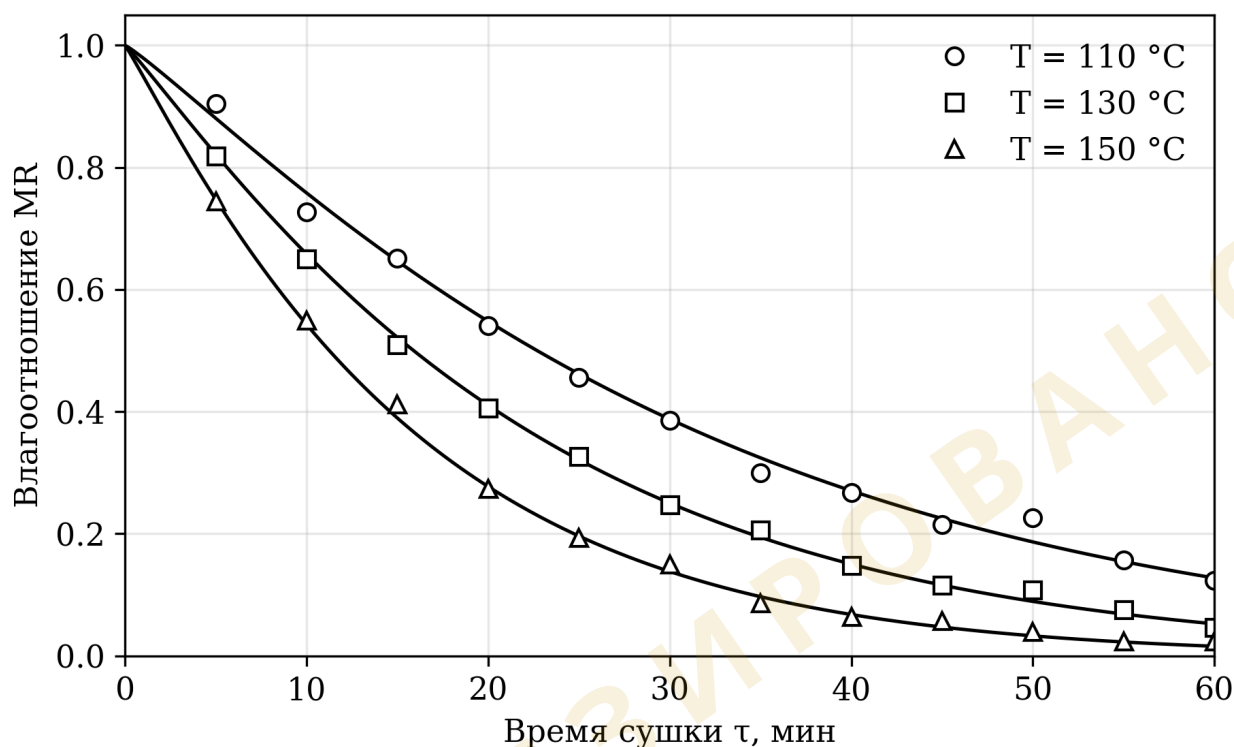


Рис. 1. Кинетические кривые сушки хлопка-сырца при разной температуре сушильного агента (точки — эксперимент, линии — модель Пейджа)

Матрица планирования и средние значения конечной влажности по трём повторностям представлены в табл. 2.

Таблица 2 — Матрица планирования эксперимента и конечная влажность хлопка-сырца

№ опыта	x_1	x_2	T, °C	N, мин ⁻¹	Wк, %
1	-1	-1	110	8	9,4
2	+1	-1	150	8	7,6
3	-1	+1	110	12	10,1
4	+1	+1	150	12	8,5

После обработки результатов получено уравнение регрессии в кодированных переменных:

$$W_k = 8,90 - 0,85x_1 + 0,40x_2 \quad (4)$$

Коэффициент $b_{12} = 0,05$ оказался незначимым (расчётное значение критерия Стьюдента меньше табличного), и соответствующее слагаемое исключено из модели. Проверка по критерию Фишера подтвердила адекватность уравнения (4). Из уравнения следует, что температура сушильного агента влияет на конечную влажность примерно вдвое сильнее, чем частота вращения барабана. Положительный знак коэффициента при x_2

объясняется сокращением времени пребывания хлопка в барабане при увеличении частоты вращения, что согласуется с известными зависимостями для барабанных аппаратов [8, с. 164; 9].

Практическое значение уравнения (4) состоит в том, что при известной входной влажности хлопка-сырца оно позволяет подобрать сочетание температуры и частоты вращения, обеспечивающее заданную конечную влажность при минимальной температуре сушильного агента. Так, для получения $W_k = 8,5 \%$ при $N = 10 \text{ мин}^{-1}$ достаточно температуры около 138°C вместо обычно применяемых $150\text{--}160^\circ\text{C}$, что снижает риск термического повреждения волокна и расход топлива. Использование модели Пейджа совместно с уравнением (4) в контуре управления позволяет перейти от стабилизации температуры к регулированию по влажности материала [10, 11].

Ограничением работы является лабораторный масштаб установки и один сорт хлопка-сырца; перенос результатов на промышленные сушилки требует уточнения коэффициентов по данным производственных испытаний.

Выводы

1. Сушка хлопка-сырца в барабанной сушилке в исследованном диапазоне режимов протекает в периоде падающей скорости; наилучшее описание кинетики обеспечивает модель Пейджа ($R^2 = 0,989\text{--}0,994$, $\text{RMSE} \leq 0,018$).

2. Константа скорости сушки возрастает с $0,021$ до $0,052 \text{ мин}^{-n}$ при повышении температуры сушильного агента со 110 до 150°C ; показатель n изменяется в пределах $1,07\text{--}1,12$.

3. Получено адекватное уравнение регрессии (4), согласно которому температура сушильного агента влияет на конечную влажность примерно вдвое сильнее, чем частота вращения барабана; взаимодействие факторов незначимо.

4. Полученные зависимости могут служить основой алгоритма адаптивного управления барабанной сушилкой по фактической влажности поступающего хлопка-сырца.

Список литературы

1. Лыков А. В. Теория сушки. — 2-е изд., перераб. и доп. — Москва : Энергия, 1968. — 472 с.
2. Гинзбург А. С. Основы теории и техники сушки пищевых продуктов. — Москва : Пищевая промышленность, 1973. — 528 с.
3. Lewis W. K. The rate of drying of solid materials // Industrial & Engineering Chemistry. — 1921. — Vol. 13, No. 5. — P. 427–432.
4. Henderson S. M., Pabis S. Grain drying theory I: Temperature effect on drying coefficient // Journal of Agricultural Engineering Research. — 1961. — Vol. 6. — P. 169–174.
5. Page G. E. Factors influencing the maximum rates of air drying shelled corn in thin layers : M.S. thesis. — West Lafayette : Purdue University, 1949.
6. Kudra T., Mujumdar A. S. Advanced Drying Technologies. — 2nd ed. — Boca Raton : CRC Press, 2009. — 438 p.
7. Handbook of Industrial Drying / ed. by A. S. Mujumdar. — 4th ed. — Boca Raton : CRC Press, 2014. — 1348 p.

8. Keey R. B. Drying of Loose and Particulate Materials. — New York : Hemisphere Publishing, 1992. — 504 p.
9. Strumillo C., Kudra T. Drying: Principles, Applications and Design. — New York : Gordon and Breach, 1986. — 448 p.
10. Åström K. J., Hägglund T. PID Controllers: Theory, Design, and Tuning. — 2nd ed. — Research Triangle Park : ISA, 1995. — 343 p.
11. Ogata K. Modern Control Engineering. — 5th ed. — Upper Saddle River : Prentice Hall, 2010. — 894 p.
12. Montgomery D. C. Design and Analysis of Experiments. — 8th ed. — Hoboken : Wiley, 2012. — 730 p.