

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА КОНВЕКТИВНОЙ СУШКИ ПОДОШВЕННОЙ КОЖИ

А.И. Ольшанский

ВВЕДЕНИЕ

Сушка влажных материалов – сложный теплофизический процесс, в котором изменяются структурно-механические и технологические свойства материала. Сушка должна обеспечивать высокие технологические свойства и качество продукции при обезвоживании материала. Кожи относятся к группе термочувствительных капиллярно-пористых коллоидных материалов, имеющих сложную связь влаги с материалом.

Основным препятствием для интенсивной быстрой сушки таких материалов является усадка, изменение формы и коробление. Важным технологическим фактором при сушке кож является сохранение формы при последующих технологических операциях. Поэтому выбор режимных параметров процесса сушки – температуры и скорости движения теплоносителя – играет важную роль при определении технологического режима в конкретных условиях производства.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Задача исследования кинетики сушки влажных материалов заключается в изучении закономерностей изменения среднеинтегральных влагосодержаний W и температуры \bar{t} с течением времени τ . Эти закономерности кинетики сушки позволяют рассчитать количество испаренной влаги из материала, расход тепла на сушку, длительность процесса до заданного влагосодержания W и текущую температуру материала в периоде убывающей скорости.

Традиционные методы расчета кинетики сушки разработаны в трудах А.В. Лыкова, Г.К. Филоненко, В.В. Красникова и др. [1, 2, 3]. Суть методов заключается в интегрировании кривой скорости сушки и температурной кривой.

Исследование процесса сушки подошвенной кожи проведем на основе методов, не связанных с интегрированием кривой скорости.

1. Регулярный тепловой режим. Из практики и теории сушки известно, что интенсивность испарения влаги, интенсивность теплообмена и среднеинтегральная температура влажного тела для периода убывающей скорости изменяются по экспоненциальному закону [4].

В процессах нагревания твердых тел широко используется теория регулярного режима Г.М. Кондратьева [4], когда процесс нагревания определяется только условиями внешнего теплообмена, теплофизическими свойствами и размерами тела, а температура влажного материала изменяется во времени по экспоненциальному закону при условии протекания процесса при $t_c = const$, где t_c – температура среды. Нагрев влажного тела при $t_c = const$ для периода убывающей скорости сушки представляет собой регулярный режим как по температуре и влагосодержанию, так и по тепловым потокам [4, 5].

Основной принцип регулярного режима и для нагревания влажного тела и интенсивности испарения влаги во втором периоде выражается соотношениями [5, 6]

$$-\frac{d\bar{t}}{d\tau} = m_t(t_c - \bar{t}); \quad (1)$$

$$-\frac{dW}{d\tau} = m_u(W - W_p), \quad (2)$$

где $d\bar{t}/d\tau$ и $dW/d\tau$ – скорости изменения температуры и влагосодержания во времени, \bar{t} и W – текущие значения температуры и влагосодержания материала, m_t и m_u – темп нагревания влажного тела и темп убыли влагосодержания, мин⁻¹.

Константы m_t и m_u определяются экспериментально, построением зависимостей $\ln(t_c - \bar{t}) = f(\tau)$ и $\ln(W - W_p) = f(\tau)$ [6, 7].

Отчет времени сушки при построении зависимостей для всех режимов подошвенной кожи ведется от $\tau = 0$ и влагосодержания $W_{кр}$, а среднеинтегральная температура \bar{t} от средней температуры материала в первом периоде \bar{t}_0 . Постоянные m_t и m_u в условиях регулярного режима являются постоянными и не зависят от режимных параметров процесса сушки.

Для стадии регулярного режима нагревания тел любой формы справедливо уравнение теплового баланса [4 – 7]:

$$c\rho V \frac{d\bar{t}}{d\tau} = \bar{\alpha}F(t_c - t_{II}) = c\rho V(t_c - \bar{t})m_t, \quad (3)$$

где c и ρ – теплоемкость (Дж/кг·°C) и плотность ($\frac{кг}{м^3}$) влажного тела; V и F – объем ($м^3$) и поверхность ($м^2$) влажного тела; t_c , t_{II} , \bar{t} – температура среды, поверхности и среднеинтегральная температура влажного тела, °C; $\bar{\alpha}$ – коэффициент теплообмена в периоде падающей скорости сушки, Вт/м²·°C.

Из уравнения теплового баланса можно записать

$$m_t = \frac{\bar{\alpha}F}{c\rho V} \frac{t_c - t_{II}}{t_c - \bar{t}} = \frac{\bar{\alpha}}{c\rho R_v} \psi. \quad (4)$$

Здесь $\psi = \frac{t_c - t_{II}}{t_c - \bar{t}}$ – параметрический критерий, характеризующий неравномерность

распределения температуры во влажном теле; $R_v = V / F$ – отношение объема влажного тела к поверхности, (м).

Коэффициент теплообмена $\bar{\alpha}$ в процессе сушки подошвенной кожи вычислялся по формуле [8]

$$Nu = 0,8 Re^{0,5} \left(\frac{T_c}{T_M} \right)^2 \left(\frac{W}{W_{кр}} \right)^{0,25}, \quad (5)$$

где Nu – критерий Нуссельта; Re – критерий Рейнольдса; T_c и T_M – абсолютные температуры среды и мокрого термометра, К.

Поправка $(W / W_{кр})$ учитывает уменьшение коэффициента теплоотдачи $\bar{\alpha}$ с уменьшением влагосодержания W . Связь между относительной температурой ΔT^* и относительной скоростью сушки N^* устанавливается соотношением [8]

$$T^* = \frac{t_c - t_{II}}{t_c - t_M} = N^{*0,43}. \quad (6)$$

Температура мокрого термометра t_M при конвективной сушке тонких материалов выше среднеинтегральной \bar{t}_0 в первом периоде на 1,5 – 3 °C. Пренебрегая этим различием, можно записать для относительных температур ΔT^* и ψ отношение

$$\frac{\Delta T^*}{\psi} = \frac{t_c - t_{II}}{t_c - t_0} / \frac{t_c - t_{II}}{t_c - \bar{t}} = \frac{t_c - \bar{t}}{t_c - \bar{t}_0}. \quad (7)$$

Уравнение (7) позволяет от температуры на поверхности материала перейти к среднеинтегральной \bar{t} .

Температура материала в первом периоде \bar{t}_0 определяется по соотношению [6, 7].

$$\bar{t}_0 = 10 + 0,29t_c. \quad (8)$$

2. Метод обобщения кривых сушки. Из метода обобщения кривых сушки [1, 2, 3] следует, что относительная скорость N^* и обобщенное время $N\tau$ являются функциями влагосодержания $N^* = f(N\tau)$. Анализ и обработка большого числа экспериментальных данных по сушке различных влажных материалов показала, что независимо от способа сушки обработку экспериментальных данных целесообразно проводить в виде зависимостей [9]

$$N^* = \exp(-aN\tau); \quad (9)$$

$$N^* = (N\tau)^{-K}, \quad (10)$$

где a и K – константы, определяемые экспериментально.

Метод обработки опытных данных с использованием обобщенного времени $N\tau$ и относительной скорости сушки N^* получил широкое использование в практике сушки [1, 2, 3], поскольку при сушке самых различных материалов разными методами обобщенное время $N\tau$ и относительная скорость N^* являются лишь функциями влагосодержания $W(N^* = f(N\tau))$.

Произведение двух обобщенных параметров N^*Rb также можно выразить эмпирическим соотношением [9]

$$N^*Rb = \frac{1}{N} \frac{dW}{d\tau} \frac{c}{r} \frac{d\bar{t}}{dW} = B \exp(-aN\tau), \quad (11)$$

где c – теплоемкость влажного тела, кДж/кг·°C; r – теплота парообразования, кДж/кг·°C; $d\bar{t}/dW$ – температурный коэффициент сушки. Постоянные a и B определяются экспериментально.

Критерий Ребиндера определяется эмпирической зависимостью [6]

$$Rb = A \exp(-n(W - W_p)). \quad (12)$$

Постоянные A и n для подошвенной кожи: $A = 0,5$, $n = 8,5 \cdot 10^{-2}$.

3. Метод расчета кинетики сушки по результатам аналитического решения уравнений тепломассопереноса при условии сушки неограниченной влажной пластины в среде с постоянной температурой $t_c = const$. А.В. Лыков [10] отмечает, что при отсутствии в материале термического переноса вещества и фазовых превращений (малых ∇t и ∇W) взаимосвязь между тепломассопереносом и массопереносом при значении критерия Федорова $Fe = Pn \cdot Ko \cdot \varepsilon \rightarrow 0$ устанавливается тождественными уравнениями [4, 10, 11]

$$\theta_t = \frac{t_c - t_{II}}{t_c - t_{o.c.}} = f_1(\exp Fo \cdot Pd); \quad (13)$$

$$\theta_u = \frac{W - W_p}{W_{kp} - W_p} = f_2(\exp Fo_m \cdot Pd_m), \quad (14)$$

где θ_t и θ_u – безразмерные потенциалы тепло- и массопереноса; W , W_{kp} , W_p – текущее, критическое и равновесное влагосодержание материала; $t_{o.c.}$ – температура окружающей среды; Fo , Fo_m , Pd , Pd_m – теплообменные и массообменные критерии Фурье и Предводителя; Pn – критерий Поснова; Ko – критерий Коссовича; ε – критерий фазового превращения.

Критерий Коссовича Ko вычислялся по локальным перепадам влагосодержаний и температур по сечению влажного материала.

При всех режимах конвективной сушки подошвенной кожи $t_c = 40 - 60$ °C и скорости воздуха $v = 3 - 5$ м/с перепады температур и влагосодержаний между поверхностными и центральными слоями в периоде убывающей скорости составляли $\Delta t \approx 4 - 5$ °C, $\Delta W \approx 3 - 5$ % при толщине материала $\delta \approx 3,5 - 4$ мм.

При таких условиях практически критерий $Fe = 0$.

Произведение критериев $Fo \cdot Pd$ и $Fo_m \cdot Pd_m$ представляют соотношения [4, 10, 11]

$$Fo \cdot Pd = \frac{a \tau}{R^2} \cdot \frac{\beta_t R^2}{a} = \beta_t \tau; \quad (15)$$

$$Fo_m \cdot Pd_m = \frac{a_m \tau}{R^2} \cdot \frac{\beta_u R^2}{a_m} = \beta_u \tau, \quad (16)$$

где a и a_m – коэффициенты диффузии тепла и влаги, м²/ч; R – характерный размер тела, равный для плоских материалов толщине $R = \delta$ (м); β_t и β_u – скорости изменения температуры и влагосодержания влажного материала, мин⁻¹.

На основании уравнений (13) и (14) можно записать

$$\theta_t = \frac{t_c - t_{II}}{t_c - t_{o.c.}} = \exp(-\beta_t \tau); \quad (17)$$

$$\theta_u = \frac{W - W_p}{W_{kp} - W_p} = \exp(-\beta_u \tau). \quad (18)$$

Метод обработки экспериментальных данных с использованием результатов аналитических решений уравнений тепломассообмена придает исследованию более обобщенный характер и сближает теорию и практику сушки.

Результаты экспериментальных исследований.

Исследование сушки подошвенной кожи и обработку экспериментальных данных проведем по трем представленным методам, не обращаясь к интегрированию кривой скорости сушки.

На рис. 1 представлены типичные кривые сушки подошвенной кожи при режимах: $t_c = 40, 50, 60$ °C и скорости воздуха $v = 3$ м/с. Критическое влагосодержание материала, соответствующее началу периода падающей скорости $W_{kp} \approx 57 - 60$ %, равновесное влагосодержание $W_p \approx 12 - 15$ %.

На рис. 2 изображены зависимости $\ln(t_c - \bar{t}) = f(\tau)$ и $\ln(W - W_p) = f(\tau)$ при конвективной сушке подошвенной кожи, из которых определяются время сушки во втором периоде, средняя температура материала и значения постоянных m_t и m_u .

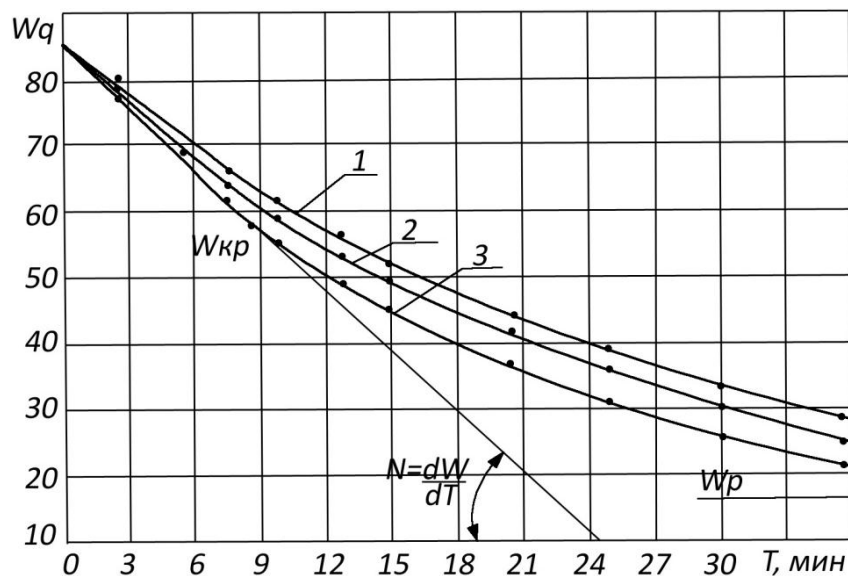


Рисунок 1 – Кривые сушки подошвенной кожи при режимах: 1 – $t_c = 40$ °C; 2 – $t_c = 50$ °C; 3 – $t_c = 60$ °C; скорость воздуха $v = 3$ м/с; относительная влажность $\varphi = 15$ %

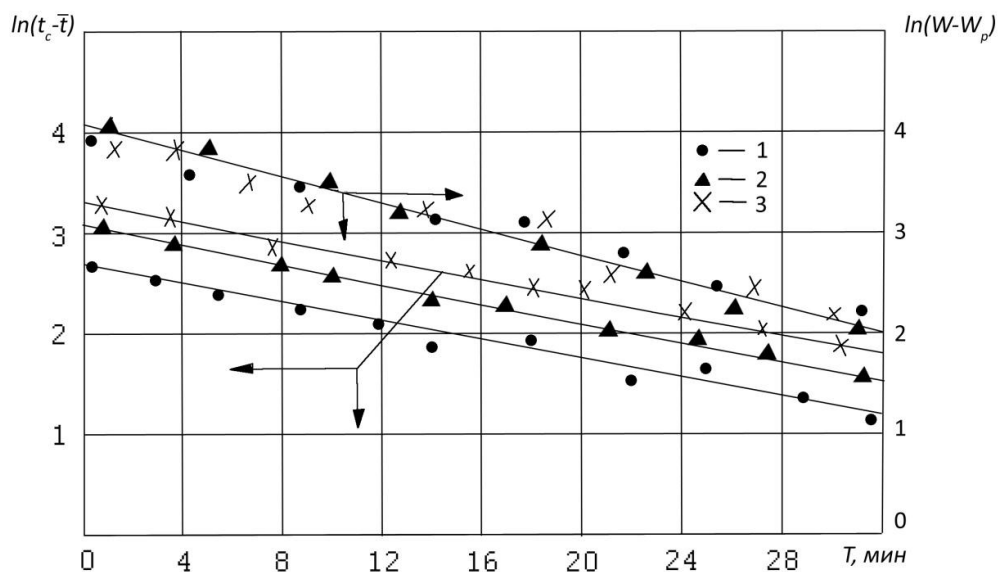


Рисунок 2 – Зависимости $\ln(t_c - \bar{t}) = f(\tau)$ и $\ln(W - W_p) = f(\tau)$ в процессе сушки подошвы для определения констант m_t и m_u при режимах: 1 – $t_c = 40$ °C; 2 – $t_c = 50$ °C; 3 – $t_c = 60$ °C; ($v = 3 - 5$ м/с); $\varphi = 15$ %

$$\tau_{II} = \frac{1}{m_t} \ln \left(\frac{t_c - \bar{t}_0}{t_c - \bar{t}} \right); \quad (19)$$

$$\tau_{II} = \frac{1}{m_u} \ln \left(\frac{W_{кр} - W_p}{W - W_p} \right). \quad (20)$$

Из уравнения (19) вычисляется среднеобъемная температура материала во втором периоде сушки:

$$\bar{t} = \frac{t_c - \bar{t}_0}{\exp(m_t \tau_{II})}, \quad (21)$$

где τ_{II} – текущее время сушки во втором периоде, соответствующее текущему значению температуры \bar{t} .

Значения постоянных m_t и m_u даны в таблице 1.

Таблица 1 – Значения констант для расчета кинетики процесса сушки подошвенной кожи в диапазоне режимов $t_c = 40 - 60^\circ\text{C}$, $v = 3 - 5$ м/с

W_0 , %	$W_{кр}$, %	m_t , мин ⁻¹ (26)	m_u , мин ⁻¹ (27)	a , 1/% (34)	K , 1/% (35)	β_t , мин ⁻¹ (17)	β_u , мин ⁻¹ (18)	A (12)	n (12)
86	57-60	0,04	0,055	0,014	0,27	0,045	0,06	0,5	$8,5 \cdot 10^{-2}$

Температура \bar{t}_0 вычисляется по соотношению (8).

Представляет интерес установить взаимосвязь и закономерности изменения относительной температуры ΔT^* и коэффициента неравномерности распределения температуры в материале ψ от влагосодержания W .

На рис. 3 изображены зависимости ΔT^* , ψ и отношение $\Delta T^* / \psi$ от влагосодержания W при сушке подошвенной кожи. Как следует из рис. 3, характер изменения ΔT^* и ψ существенно различается. Коэффициент неравномерности ψ практически с началом второго периода (стадия регулярного режима) принимает значения $\psi = 0,83 - 0,87$ независимо от режима сушки (рис. 3).

Следовательно, в стадии регулярного режима при величине критерия Био $Bi < 0,5$ и малых значениях коэффициента теплоотдачи $\alpha \approx 20 - 35$ Вт/м²·°C (малоинтенсивная сушка) происходит быстрое усреднение температур по поверхности и объему материала, а среднеинтегральная температура \bar{t} стремится к температуре поверхности t_{II} . Зависимости $\Delta T^* = f(W)$ имеют вид прямых.

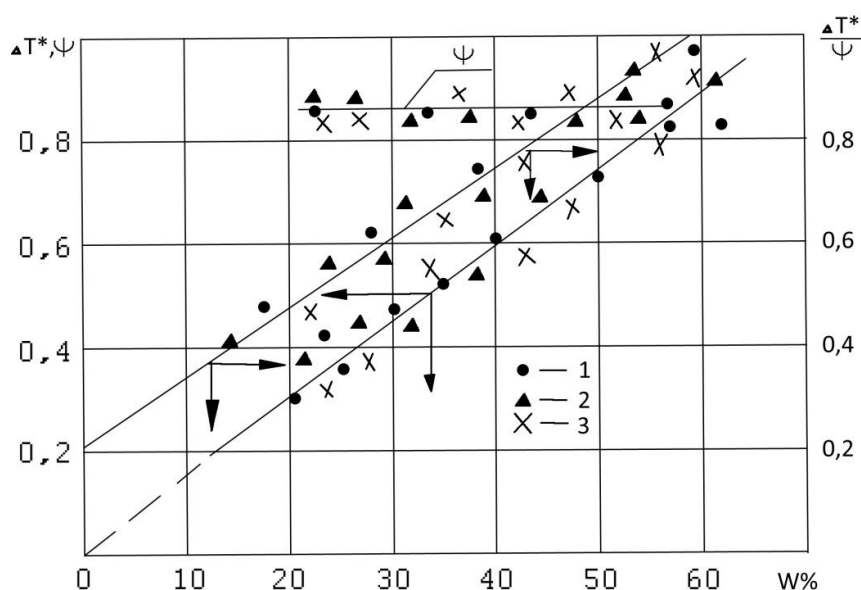


Рисунок 3 – Зависимость относительной температуры ΔT^* и коэффициента неравномерности распределения температуры ψ и отношения $\Delta T^* / \psi$ от

влажностерержания W в процессе сушки подошвы. Режимы сушки указаны на рис. 2

Линейная зависимость $\Delta T^* / \psi = f(W)$ (рис. 3) представляет зависимость, обратную коэффициенту неравномерности ψ ($\Delta T^* / \psi = 1 / \psi$).

Эту зависимость можно выразить соотношением

$$\frac{\Delta T^*}{\psi} = \frac{t_c - \bar{t}}{t - t_0} = K_w \cdot W + 0,2.$$

Тогда среднеинтегральная температура материала во втором периоде

$$\bar{t} = t_c - (t_c - \bar{t}_0)(K_w \cdot W + 0,2). \quad (22)$$

Параметр K_w уравнения (22) при сушке подошвенной кожи можно приближенно вычислить по выражению

$$K_w = 0,014 \frac{W}{W_{kp}}. \quad (23)$$

Теплообменный критерий Био Bi ($Bi \approx \alpha R / \lambda_k$) и коэффициент теплоотдачи $\bar{\alpha}$ во втором периоде сушки определялись по выражению (5). Теплопроводность и теплоемкость влажной подошвенной кожи λ_w и c_w вычислялись по соотношениям [12]

$$\lambda_w = \lambda_0 + 1,5 \cdot 10^{-3} W, \text{ Вт/м} \cdot \text{°C}$$

$$c_w = c_0 + c_e \frac{W}{100},$$

где $\lambda_0 \approx 0,15$ Вт/м·°C – теплопроводность сухой подошвы;
 $c_0 \approx 1,3 - 1,5$ кДж/кг·°C – теплоемкость сухой подошвы.

Проведем обработку опытных данных по сушке подошвенной кожи по методу обобщенных кривых сушки.

Запишем зависимости (9), (10) и (11) в виде уравнений для кривой скорости и температурной кривой:

$$-\frac{dW}{d\tau} = N \exp(-aN\tau); \quad (24)$$

$$-\frac{dW}{d\tau} = N(N\tau)^{-K}; \quad (25)$$

$$\frac{d\bar{t}}{d\tau} = N \frac{r}{c} N^* Rb = N \frac{r}{c} B(-aN\tau), \quad (26)$$

где N – скорость сушки в первом периоде, %/мин; Критерий Ребиндера Rb находится по формуле (12).

Интегрированием уравнений (24), (25), (26) с учетом времени сушки в первом периоде $\tau_I = W_0 - W_{kp} / N$ и уравнения (16) для второго периода определяется продолжительность сушки и среднеобъемная температура материала от начального влагосодержания W_0 до заданного текущего W :

$$\tau_{полн} = \frac{1}{N} \left((W_0 - W_{kp}) - \frac{1}{a} \ln(1 - a(W_{kp} - W)) \right); \quad (27)$$

$$\tau_{\text{полн}} = \frac{W_0 - W_{\text{кр}}}{N} + \left(\left(\frac{W_{\text{кр}} - W}{N^{1-K}} \right) (1-K) \right)^{1/(1-K)}; \quad (28)$$

$$\bar{t} = t_c - \frac{B\tau}{ca} \exp(-aN\tau). \quad (29)$$

Постоянные a и K определяются по соотношениям

$$a = \frac{0,8}{W_{\text{кр}}}; \quad K = 0,2 + \frac{4,2}{W_{\text{кр}}}. \quad (30)$$

На рис. 4 (а, б) представлена обработка экспериментальных данных по сушке подошвенной кожи в виде зависимостей $\lg N^* = f(N\tau)$ и $\lg N^* Rb = f(N\tau)$, из которых видно, что зависимости эти линейные. Уравнение (30) устанавливает взаимосвязь между теплообменом и температурой материала в периоде падающей скорости сушки.

Числовой коэффициент B уравнения (30) для подошвенной кожи вычисляется по выражению

$$B = 10^{-3} \exp((-0,05(W_{\text{кр}} - W)). \quad (31)$$

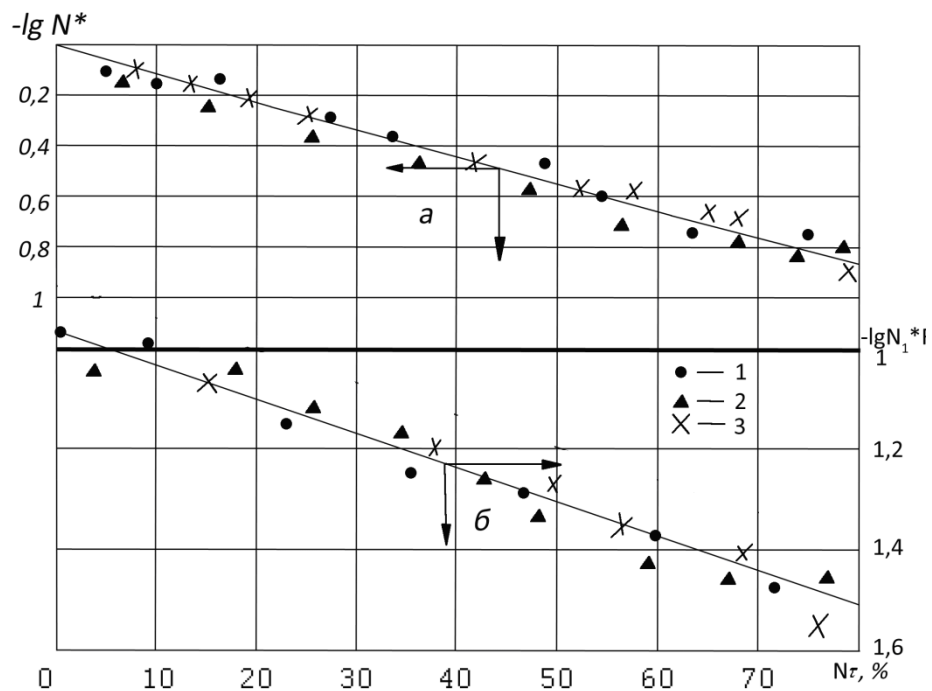


Рисунок 4 – Зависимости относительной скорости сушки N^* и произведения $N^* Rb$ от обобщенного времени $N\tau$. Режимы сушки указаны на рис. 2

Установим взаимосвязь между плотностями тепловых потоков в первом и втором периодах сушки, температурой и влажностью материала в периоде падающей скорости сушки.

Основное уравнение кинетики сушки А.В. Лыкова [1], устанавливающее связь между теплообменом и влагообменом, имеет вид:

$$q^* = \frac{q_{II}}{q_I} = N^* (1 + Rb) = N^* + N^* Rb. \quad (32)$$

Тепловой поток в периоде постоянной скорости сушки

$$q_I = r\rho_0 R_V \frac{N}{100}, \text{ Вт/м}^2. \quad (33)$$

Тепловой поток во втором периоде

$$q_{II} = \bar{\alpha}(t_c - t_{II}), \text{ Вт/м}^2. \quad (34)$$

На основании выражений (9) и (11) можно записать уравнение для относительного теплового потока:

$$q^* = (\tau) = \exp(-aN\tau) + B \exp(-aN\tau) = (1 + B) \exp(-aN\tau). \quad (35)$$

С учетом уравнения (29) получим

$$q^* = (\tau) = (1 + B) \frac{(t_c - t) \cdot a \cdot c}{B \cdot r}, \quad (36)$$

где коэффициент B вычисляется по соотношению (31).

Обработкой опытных данных конвективной сушки подошвенной кожи в диапазоне режимных параметров $t_c = 40 - 60$ и $v = 3 - 5$ м/с установлена закономерность изменения относительного теплового потока для периода падающей скорости сушки:

$$q^* = 0,1 \exp(2,8 \frac{W}{W_{кр}}) \quad W_p < W < W_{кр}. \quad (37)$$

Зависимость (37) представлена на рис. 5.

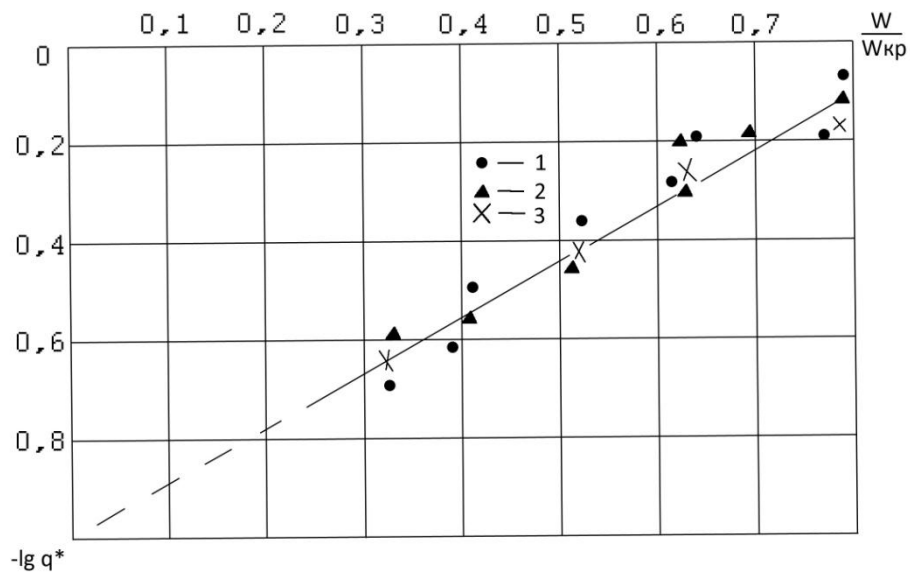


Рисунок 5 – Зависимость относительного теплового потока q^* от относительного влагосодержания $W / W_{кр}$ для процесса сушки подошвенной кожи в периоде падающей скорости сушки

Результаты обработки экспериментальных данных по всем методам тщательно проверены путем сопоставления расчетных значений, по полученным уравнениям с экспериментом и представлены в таблицах 2 и 3. В таблице 1 даны значения всех констант, необходимые для расчета кинетики процесса сушки подошвенной кожи в диапазоне режимов: $t_c = 40 - 60$ °C, $v = 3 - 5$ % и относительной влажности $\phi = 15$ %.

Таблица 2 – Сопоставление расчетных данных по формулам (27), (28), (18), (21), (22) и (30) с экспериментом при сушке подошвенной кожи для режима:

$$t_c = 50 \text{ }^\circ\text{C}, v = 5 \text{ м/с}, \varphi = 15 \%$$

$W, \%$	$\tau_{\text{экс.}},$ МИН	$\tau,$ МИН (34)	$\tau,$ МИН (35)	$\tau,$ МИН (18)	$\bar{t},$ $^\circ\text{C}$ экс.	$\bar{t},$ $^\circ\text{C}$ (28)	$\bar{t},$ $^\circ\text{C}$ (29)	$t,$ $^\circ\text{C}$ (36)
45	17	16,3	18,3	16,4	28	28,8	28	27,1
36	23	21,8	24,5	21,7	38	40,8	36,5	37
24	36	35,2	37,5	35,3	44	45,2	46	44

Таблица 3 – Расчетные значения безразмерных тепловых потоков q^* в процессе сушки подошвенной кожи при режиме: $t_c = 60 \text{ }^\circ\text{C}, v = 5 \text{ м/с}, W_0 = 86 \%, W_{кр} = 58 \%$

$W, \%$	Rb (12)	$N^*_{\text{экс.}}$	q^* (38)	$q^* \frac{(39)}{(40)}$	q^* (42)	N^* (9)	q^* (43)
45	0,069	0,68	0,68	0,67	0,61	0,68	0,7
36	0,079	0,55	0,55	0,54	0,49	0,56	0,51
27	0,092	0,37	0,39	0,39	0,33	0,37	0,35
24	0,125	0,25	0,27	0,3	0,24	0,27	0,3

ВЫВОДЫ

Исследование процесса сушки подошвенной кожи, проведенное тремя различными методами обработки экспериментальных данных, позволило получить необходимые зависимости для расчета кинетики процесса сушки подошвенной кожи. Проведено сопоставление расчетных значений основных параметров сушки, полученных по формулам с экспериментом. Сравнение расчетных и экспериментальных значений показало, что такое совпадение значений находится в пределах точности проведения эксперимента, а результаты исследований могут использоваться в инженерной практике для расчетов процесса сушки подошвенных кож в диапазоне указанных режимных параметров.

Список использованных источников

1. Лыков, А. В. Теория сушки / А. В. Лыков. – Москва : Энергия, 1968. – 473 с.
2. Красников, В. В. Кондуктивная сушка / В. В. Красников. – Москва : Энергия, 1973. – 380 с.
3. Филоненко, Г. К. Сушильные установки / Г. К. Филоненко. – Москва : Госэнергоиздат, 1952. – 421 с.
4. Лыков, А. В. Теория теплопроводности / А. В. Лыков. – Москва : Высшая школа, 1967. – 600 с.
5. Лыков, А. В. Тепломассообмен : справочник / А. В. Лыков. – Москва : Энергия, 1971. – 651 с.
6. Ольшанский, А. И. Исследование процесса тепловлагообмена в периоде убывающей скорости сушки методом регулярного режима / А. И. Ольшанский, В. И. Ольшанский. – Минск : Инженерно-физический журнал. Т. 84. – № 4. – 2011. – С.705-714.
7. Ольшанский, А. И. Исследование процесса сушки тонких материалов методом регулярного режима / А. И. Ольшанский, В. И. Ольшанский // Известия НАН Беларуси, серия физико-технических наук. – № 2. – 2011. – С.75-81.
8. Лыков, А. В. Кинетика теплообмена в процессе сушки влажных материалов / А. В. Лыков, П. С. Куц, А. И. Ольшанский. – Минск : Инженерно-физический журнал. Т. 23. – № 3. – С.401-407.
9. Ольшанский, А. И. Некоторые закономерности кинетики влаготеплообмена при сушке влажных материалов / А. И. Ольшанский, Е. Ф. Макаренко, В. И. Ольшанский // Инженерно-физический журнал. Т.81. – № 6. – 2008. – С.1102-1110.

10. Лыков, А. В. Теория тепло- и массопереноса / А. В. Лыков, Ю. А. Михайлов. – Москва-Ленинград : Госэнергоиздат, 1963. –535 с.
11. Пехович, А. И. Расчеты теплового режима твердых тел / А. И. Пехович, В. М. Жидких. – Ленинград : Энергия, 1968. – 303 с.
12. Кавказов, Ю. Л. Тепло- и массообмен в технологии кожи и обуви / Ю. Л. Кавказов. – Москва : Легкая индустрия, 1973. – С.272.

Статья поступила в редакцию 16.01.2012