

**ИССЛЕДОВАНИЕ КИНЕТИКИ КОНВЕКТИВНОЙ СУШКИ НАТУРАЛЬНЫХ КОЖ****EXAMINATION OF KINETICS OF NATURAL LEATHERS CONVECTIVE DRYING****А.И. Ольшанский, А.Л. Климентьев\*****В.В. Петренко***Витебский государственный технологический университет*

УДК 675.026.267

**A. Alshanski, A. Klimentyev\*****V. Petrenko***Vitebsk State Technological University***РЕФЕРАТ**

*НАТУРАЛЬНАЯ КОЖА, КОНВЕКТИВНАЯ СУШКА, ВЛАГОСОДЕРЖАНИЕ, ТЕМП НАГРЕВА ТЕЛА, РЕГУЛЯРНЫЙ РЕЖИМ, КРИТЕРИЙ БИО, ЧИСЛО РЕБИНДЕРА, СРЕДНЕИНТЕГРАЛЬНАЯ ТЕМПЕРАТУРА*

*Представлены результаты исследования конвективной сушки различных видов натуральной кожи методом теории регулярного режима. Приведены результаты расчета плотностей тепловых потоков и среднеинтегральных температур. Получены приближенные уравнения для расчета кинетики сушки в периоде падающей скорости. Рассмотрена возможность применения в расчетах кинетики сушки результатов аналитических решений уравнений теплопереноса.*

**ABSTRACT**

*NATURAL LEATHER, CONVECTIVE DRYING, MOISTURE CONTENT, BODY HEAT RATE, REGULAR REGIME, BIO CRITERION, REBINDER NUMBER OF, AVERAGE CUMULATIVE TEMPERATURE*

*The article presents results of the study of convective drying of various types of natural leather using the theory of regular mode. The results of calculating the densities of heat fluxes and medium integral temperatures are discussed. Approximate equations are derived for calculating the drying kinetics in the period of the incident velocity. The possibility of applying the results of analytical solutions of the heat transfer equations in the calculations of drying kinetics is considered.*

**ВВЕДЕНИЕ**

Сушка натуральных кож является сложным комплексным технологическим процессом, в котором шкура, прежде чем превратиться в промышленную кожу, проходит ряд разнообразных операций, важнейшей из которых является дубление [1, 2, 3]. Следует отметить, что натуральная кожа является очень сложным и неоднородным материалом как в отношении толщины, так и в отношении своих различных физико-механических и теплофизических показателей. Влияние на эти показатели оказывает не только возраст и вид животного, но и значительное различие в строении кожной ткани для разных участков шкуры. Поэтому наблюдаются значительные колебания плотности даже для одного вида кожи в

зависимости от топографического участка шкуры, из которого вырезан образец кожи [2]. При этом кожа после дубления резко изменяет свои теплофизические константы, присущие шкуре [1, 2].

Например, для красnodубной юфти по данным эксперимента [2] обнаружено колебание плотности сухой кожи  $\rho_0$  от 400 до 560 кг/м<sup>3</sup>, для стелечного полуваля – от 550 до 650 кг/м<sup>3</sup>, для рантовой подошвы – от 880 до 980 кг/м<sup>3</sup>. Натуральная кожа относится к термочувствительным материалам, и поэтому сушка проводится при мягких температурных режимах теплоносителя  $t_c = 30-60$  °С, скорости  $v = 0,5-2$  м/с и высоких влажосодержаниях воздуха  $\phi = 40-60$  %. В процессе сушки кожа на протяжении всего процесса

\* E-mail: [klimentyev@vstu.by](mailto:klimentyev@vstu.by) (A. Klimentyev)

испытывает усадку, при которой значительно изменяются размеры, вызывающие коробление и разрушение структуры материала [1, 2, 3]. Основным препятствием для быстрой интенсивной сушки кожи при повышенных температурах является усадка, коробление и разрушение структуры материала, и поэтому выбор рациональных режимов сушки, обеспечивающих минимальную длительность сушки при высоких технологических качествах готового продукта, имеет важное значение [3]. При мягких режимах сушки кожи наблюдаются периоды постоянной температуры, на уровне температуры мокрого термометра. Основная трудность при экспериментальных исследованиях кинетики сушки в лабораторных условиях заключается в адекватном воспроизведении условий, имеющих место в сушильной установке [4]. Для уменьшения этого несоответствия при исследованиях кинетики все кривые сушки и температурные кривые систематизируются по режимам, последовательно по температурам, скоростям и влагосодержаниям в широком диапазоне изменения режимов сушки и влагосодержаний материала [4].

**ОСНОВЫ РЕГУЛЯРНОГО РЕЖИМА**

Наиболее общим признаком начала регулярного режима нагрева тела является соотношение [5, 6]

$$\frac{d\bar{t}}{d\tau} \left( \frac{1}{t_c - \bar{t}} \right) = m_t = const, \quad (1)$$

где  $m_t$  – темп нагрева материала;  $d\bar{t}/d\tau$  – скорость нагрева влажного тела;  $t_c$  – температура среды;  $\bar{t}$  – среднеобъемная температура материала.

Темп нагрева материала находится экспериментально построением графической зависимости между  $\ln(t_c - \bar{t})$  и временем  $\tau$ . В стадии регулярного режима такие графики имеют вид прямых. Темп нагрева тела зависит от формы тела, теплофизических характеристик, условий теплообмена поверхности тела с окружающей средой и не зависит от режима сушки. Для тонких плоских материалов при  $Bi < 1$   $m_t$  не зависит от толщины материала [5]. При нагревании тонких плоских влажных материалов при мягких режимах сушки наблюдаются незначительные

градиенты температуры и при отсутствии в материале термического переноса вещества при значениях  $Bi < 0,1$  (практически достаточно  $Bi < 0,4$ ) темп нагрева тела определяется уравнением [5–7]

$$m_t = \frac{\bar{\alpha}}{c_0 \cdot \rho_0 \cdot R_v}, \quad (2)$$

где  $\bar{\alpha}$  – коэффициент теплообмена;  $c_0$  – удельная теплоемкость сухого тела;  $\rho_0$  – плотность;  $R_v$  – отношение объема тела к его поверхности испарения (характерный размер влажного материала).

При таких условиях теплообмена относительная избыточная температура определяется выражением [6]

$$\bar{\theta} = \frac{t_c - \bar{t}}{t_c - t_0} = \exp(-Bi \cdot Fo). \quad (3)$$

Здесь  $Bi$  – теплообменный критерий Био;  $Fo$  – теплообменный критерий Фурье;  $\bar{\theta}$  – среднеинтегральная относительная температура.

Учитывая, что  $Bi \cdot Fo = m_t \cdot \tau_{II}$  [6–7], уравнение (3) принимает вид

$$\bar{\theta} = \frac{t_c - \bar{t}}{t_c - t_0} = \exp(-m_t \cdot \tau_{II}), \quad (4)$$

где  $\tau_{II}$  – время сушки во втором периоде. Стадия регулярного режима наступает с началом второго периода сушки. Средняя температура материала в периоде постоянной скорости сушки  $t_0$  при малых градиентах температур приближенно равна температуре мокрого термометра  $t_{MT} = t_{II} = t_0$ , где  $t_{II}$  – температура поверхности материала [9]. Среднеобъемная температура во втором периоде вычисляется из уравнения (4)

$$t = t_c - \frac{t_c - t_0}{\exp(m_t \cdot \tau_{II})} = t_c - \frac{t_c - t_{MT}}{\exp(m_t \cdot \tau_{II})}, \quad (5)$$

где  $t_0$  – температура материала в периоде постоянной скорости сушки;  $t_{MT}$  – температура

мокрого термометра.

Сушка тонких плоских материалов протекает с периодом постоянной температуры в периоде постоянной скорости сушки, и температура материала в этом периоде равна температуре мокрого термометра  $t_{MT}$ . При сушке таких материалов, когда можно пренебречь градиентом температуры по сечению тела, можно приближенно допустить равенство среднеинтегральной температуры в первом периоде сушки  $t_0 \approx t_{MT}$  [9]. Плотность потока тепла на нагрев влажного тела при конвективной сушке определяется балансовым уравнением теплообмена [8, 9]

$$q = \bar{\alpha}(t_c - \bar{t}) = c_w \frac{G_0}{F} \cdot \frac{d\bar{t}}{d\tau}, \quad (6)$$

где  $F$  – поверхность испарения материала;  $G_0$  – сухая масса материала,  $c_w$  – удельная теплоемкость влажного тела. Тогда запишем

$$\bar{\alpha} \cdot f_{yD}(t_c - \bar{t}) = c_w \frac{d\bar{t}}{d\tau}, \quad (7)$$

где  $f_{yD} = F / G_0$  – удельная поверхность тела.

Удельная поверхность материала выражается соотношением

$$f_{yD} = \frac{F}{G_0} = \frac{F}{\rho_0 \cdot V} = \frac{1}{\rho_0 \cdot R_v}, \quad (8)$$

где  $V$  – объем влажного материала.

Решением уравнения (7) при начальном условии  $\bar{t}(0) = \bar{t}_0 = t_{MT}$  (начало второго периода) получим уравнение температурной кривой [8]

$$\bar{t} = t_c - (t_c - t_{MT}) \cdot \exp\left(-\frac{\bar{\alpha} \cdot f_{yD}}{c_w} \tau_{II}\right). \quad (9)$$

Подставляя (8) в (9) с учетом (2), получим

$$\bar{t} = t_c - (t_c - t_{MT}) \cdot \exp(-m_i \cdot \tau_{II}). \quad (10)$$

Вывод уравнения (10) согласуется с решением (5), что подтверждает справедливость уравнения (4) для среднеинтегральной температуры материала при условии  $Bi < 1$  для тонких тел.

Основное уравнение кинетики сушки [3, 8, 9] запишем в виде

$$q^* = \frac{q_{II}}{q_I} = \frac{\bar{\alpha}(t_c - \bar{t})}{\bar{\alpha}_{KP}(t_c - t_{MT})} = N^*(1 + Rb), \quad (11)$$

где  $q^*$  – относительная плотность теплового потока;  $q_I$  и  $q_{II}$  – плотности потока тепла в первом и втором периодах сушки;  $\bar{\alpha}_{KP}$  – коэффициент теплообмена в периоде постоянной скорости сушки;  $Rb$  – число Ребиндера;  $N^*$  – относительная скорость сушки.

Число Ребиндера

$$Rb = \frac{c_w}{r} \left| \frac{d\bar{t}}{d\bar{u}} \right| = \frac{c_w b}{r}, \quad (12)$$

где  $b$  – температурный коэффициент сушки,  $b = d\bar{t} / d\bar{u}$ ;  $d\bar{t} / d\bar{u}$  – скорость изменения влагосодержания;  $r$  – теплота парообразования.

Число Ребиндера позволяет расчет теплообмена свести к расчету влагообмена. Температурный коэффициент сушки  $b = d\bar{t} / d\bar{u}$  находится графическим дифференцированием температурной кривой –  $\bar{t} = f(\bar{u})$ .

Для многих материалов зависимость числа  $Rb$  от влагосодержания выражается эмпирической формулой [3, 8, 9]

$$Rb = A \cdot \exp(-n_0(\bar{u} - u_p)). \quad (13)$$

Постоянные  $A$  и  $n_0$  определяются экспериментально.

На основании (12) и (13) для среднеинтегральной температуры можно записать [8, 9, 11]

$$\bar{t} = t_{MT} + \int_{\bar{u}_{KP}-u_p}^{\bar{u}-u_p} \frac{r}{c_w} \cdot Rb(\bar{u}) \cdot d\bar{u}, \quad (14)$$

где  $u_p$  и  $\bar{u}_{KP}$  – равновесное и критическое влагосодержание материала.

Интегрируя уравнение с учетом (13) для фиксированных значений температуры и влагосодержания, получим

$$\bar{t} = t_{MT} + \frac{rA}{c_w n_\theta} \left\{ \exp[-n_\theta(\bar{u} - u_p)] - \exp(n_\theta(u_{KP} - u_p)) \right\}. \quad (15)$$

Обработкой экспериментов по сушке различных видов натуральной кожи по уравнению (13) методом наименьших квадратов получена формула [7, 11]

$$Rb = 0,5 \cdot \exp(-8,5 \cdot (\bar{u} - u_p)). \quad (16)$$

**ЭКСПЕРИМЕНТ**

Первичный материал для исследования сушки натуральных кож в виде кривых сушки и температурных кривых заимствован из монографии А. В. Лыкова [2] по многочисленным опытным протоколам наблюдений. Все опыты систематизированы по температурам, скоростям движения и относительным влагосодержаниям

воздуха. Обработка эксперимента проводилась: по температурам  $t_c = 40; 50; 60$  °С; скорости воздуха  $v = 0,5; 1; 3$  м/с; по влагосодержаниям воздуха  $\phi = 30; 45; 50; 60$  %. Большой диапазон изменения режимов сушки при различных начальных влагосодержаниях кожи позволяет получить достаточно достоверные уравнения для расчета основных параметров кинетики сушки. На рисунке 1, 2 и 3 изображены кривые сушки  $\bar{u} = f(\tau)$  и температурные кривые  $\bar{t} = f(\tau)$  в процессах сушки красnodубной юфти (рисунок 1), хромового опоека (рисунок 2) и рантовой подошвы (рисунок 3) при различных режимах.

Видно, что при конвективной сушке тонких материалов наблюдаются не только периоды постоянной скорости сушки, но и периоды постоянной температуры на уровне температуры мокрого термометра  $t_{MT} \approx t_{IT}$ . С началом второго периода скорость сушки убывает, а температура непрерывно возрастает до  $t_c$  при  $\tau \rightarrow \infty$ . На рисунке 3б дана графическая зависимость  $\ln(t_c - \bar{t})$  от времени сушки  $\tau$  для рантовой подошвы, из которой определяется темп нагрева влажного тела  $m_t$ . Такие зависимости имеют вид прямых, и следовательно кривые сушки и темпе-

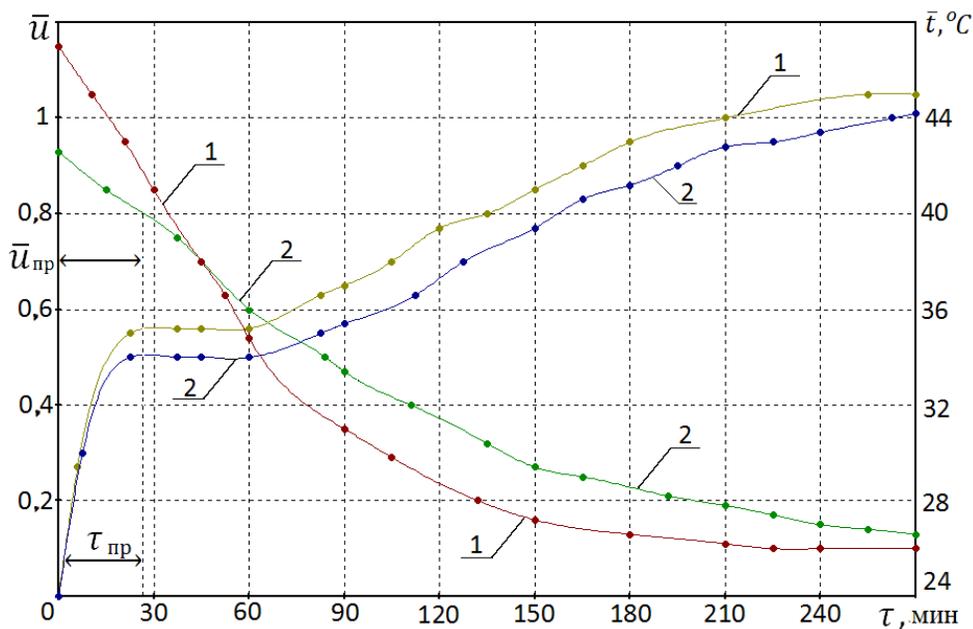


Рисунок 1 – Кривые сушки  $\bar{u} = f(\tau)$  и температурные кривые  $\bar{t} = f(\tau)$  для процессов конвективной сушки красnodубной юфти при режимах: 1 –  $t_c = 50$  °С;  $v = 1$  м/с;  $\phi = 45$  %; 2 –  $t_c = 50$  °С;  $v = 0,5$  м/с;  $\phi = 50$  %

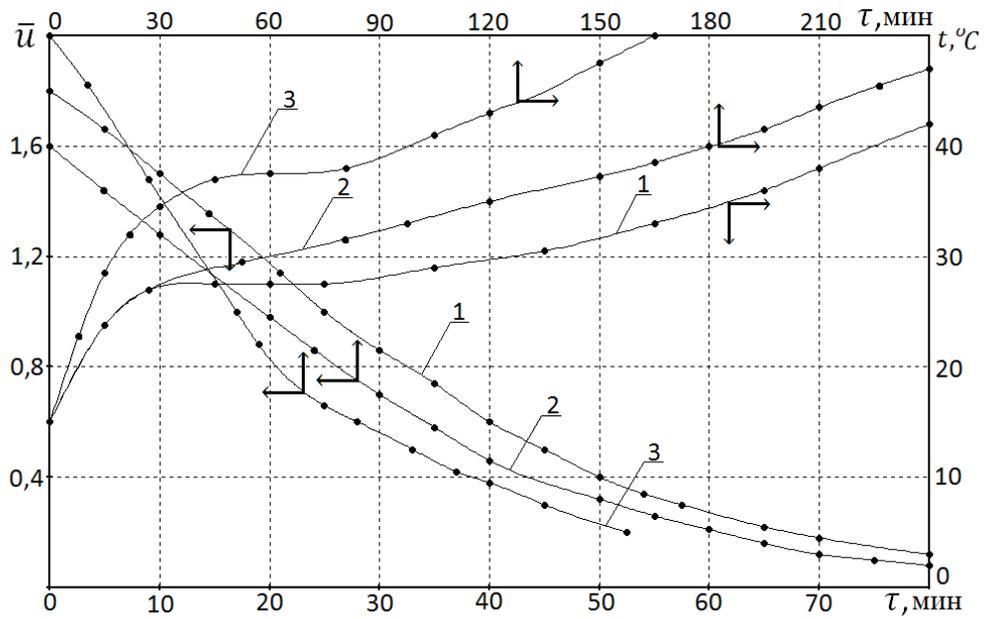


Рисунок 2 – Кривые сушки  $\bar{u} = f(\tau)$  и температурные кривые  $\bar{t} = f(\tau)$  для процессов сушки хромового опоека при режимах: 1 –  $t_c = 45 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  $v = 1 \text{ м/с}$ ;  $\varphi = 27,5 \%$ ; 2 –  $t_c = 50 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  $v = 1,5 \text{ м/с}$ ;  $\varphi = 30 \%$ ; 3 – переменный режим сушки: до  $\bar{u}_{кр} = 1$ ;  $t_c = 60 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  $\varphi = 50 \%$ ; от  $\bar{u}_{кр} = 1$  до  $\bar{u} = 0,22$ ;  $t_c = 45 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  $\varphi = 30 \%$ . Скорость воздуха  $v = 0,5 \text{ м/с}$

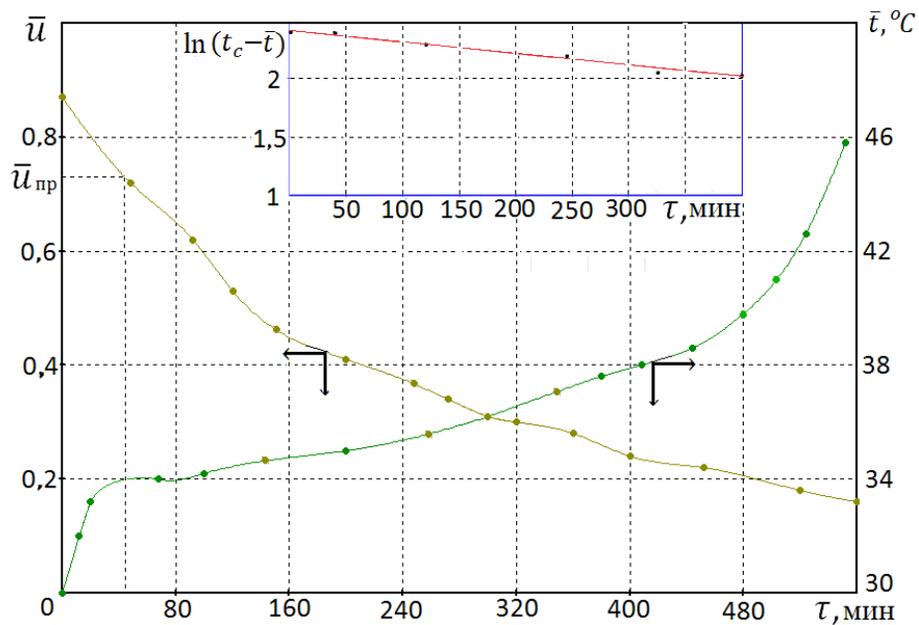


Рисунок 3 – Кривые сушки рантовой подошвы  $\bar{u} = f(\tau)$  и температурная кривая  $\bar{t} = f(\tau)$  в режиме сушки:  $t_c = 50 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  $v = 0,5 \text{ м/с}$ ;  $\varphi = 50 \%$

ратурные кривые во втором периоде представляют экспоненты. Стадия регулярного режима наступает сразу с началом второго периода, и распределение температуры внутри тела описывается экспоненциальной функцией и не зависит от начального распределения температуры. В стадии регулярного режима коэффициент неравномерности распределения температуры в теле  $\Psi = 1$ ; происходит быстрое выравнивание температур по поверхности и объёму [5]. Из теории регулярного режима следует, что чем меньше значение критерия  $Bi$ , тем быстрее все точки тела по объёму вступают в стадию регулярного режима [5, 6].

Обработкой большого числа опытных данных по сушке юфти, рантовой подошвы, опоека, стелечного полувала в широком диапазоне изменения режимных параметров установлена приближенная зависимость для темпа нагрева кожи

$$m_i = 0,03 \cdot \exp(-0,05(W_{xp} - W_p)), \quad (17)$$

где  $W_p$  и  $W_{xp}$  – равновесное и критическое влагосодержание материала в процентах (%).

#### КИНЕТИКА ТЕПЛООБМЕНА

Поскольку экспериментальных критериальных уравнений для расчета коэффициента теплообмена  $\bar{\alpha}$  еще не существовало, А. В. Лыковым [2] для определения  $\bar{\alpha}$  на основе обработки опытных данных кривых сушки и температурных кривых была получена формула

$$\bar{\alpha} \approx \frac{(c_0 + c_{ж} \cdot \bar{u}) \frac{d\bar{t}}{d\bar{u}} + r}{t_c - \bar{t}} \cdot j, \quad Bm/m^2 \quad (18)$$

где  $j$  – интенсивность испарения влаги с поверхности материала;  $c_{ж}$  – теплоемкость жидкости.

Среднеобъемная температура кожи  $\bar{t}$  для каждого текущего влагосодержания материала определялась по температурной кривой  $\bar{t} = f(\bar{u})$ . Скорость возрастания температуры  $d\bar{t} / d\bar{u}$  находится графическим дифференцированием кривой  $\bar{t} = f(\bar{u})$ . Величина  $d\bar{t} / d\bar{u}$  в дальнейшем была названа А. В. Лыковым температур-

ным коэффициентом сушки [3]. Формула (18), полученная для натуральных кож, справедлива до сушки  $u \approx 0,25$ , поскольку при  $\bar{u} < 0,25$  происходит углубление зоны испарения и значительная часть тепла идет на нарушение связи влаги с материалом, и величина  $r$  не соответствует действительности. В таблице 1 даны расчеты коэффициента теплообмена  $\bar{\alpha}$  для процесса сушки краснотрубной юфти при различных режимах по данным А. В. Лыкова [2] и сравнение этих значений  $\bar{\alpha}$ , вычисленных по-современному критериальному уравнению [1, 3, 9]. Обработкой большого количества экспериментальных данных по конвективной сушке различных материалов была установлена формула для теплообмена критерия Нуссельта [3, 8–10]

$$Nu = C \cdot Re^{0,5} \cdot \left( \frac{T_c}{T_{MT}} \right)^2 \cdot \left( \frac{\bar{u}}{\bar{u}_{KP}} \right)^n, \quad (19)$$

где  $Re$  – критерий Рейнольдса;  $T_c$  и  $T_{MT}$  – абсолютные температуры среды и мокрого материала.

Постоянная  $n$  учитывает уменьшение коэффициента теплообмена  $\bar{\alpha}$  в периоде убывающей скорости сушки. Проведена обработка опытных данных по сушке различных видов натуральной кожи в широком диапазоне изменения режимных параметров сушки с целью сопоставления полученных результатов с показателями в формуле (19). На рисунке 4 приведены результаты обработки экспериментов для зависимостей  $lgNu = f(lgRe)$  и  $lg(\bar{\alpha} / \alpha_{KP}) = f(\bar{W} / W_{KP})$  для различных кож при разных режимах сушки. Показатель степени в критерии Рейнольдса полностью совпадает с принятым в уравнении (19). Постоянная  $n = 0,75$  для всех видов натуральной кожи. Коэффициент  $C$ , определяемый уравнением  $C = Nu / Re^{0,25}$ , оказался равен  $C = 0,95$ . Показатель степени в симплексе  $(T_c / T_{MT})$ , определяется из зависимости  $lgNu / Re^{0,25} = f(lgT_c / T_{MT})$  и также практически совпадает с принятым значением в уравнении (19).

В таблице 1 дано сопоставление значений коэффициентов теплообмена по формуле А. В. Лыкова с вычисленными по критериальному уравнению (19). Отмечается явное совпадение расчетных значений  $\bar{\alpha}$ .

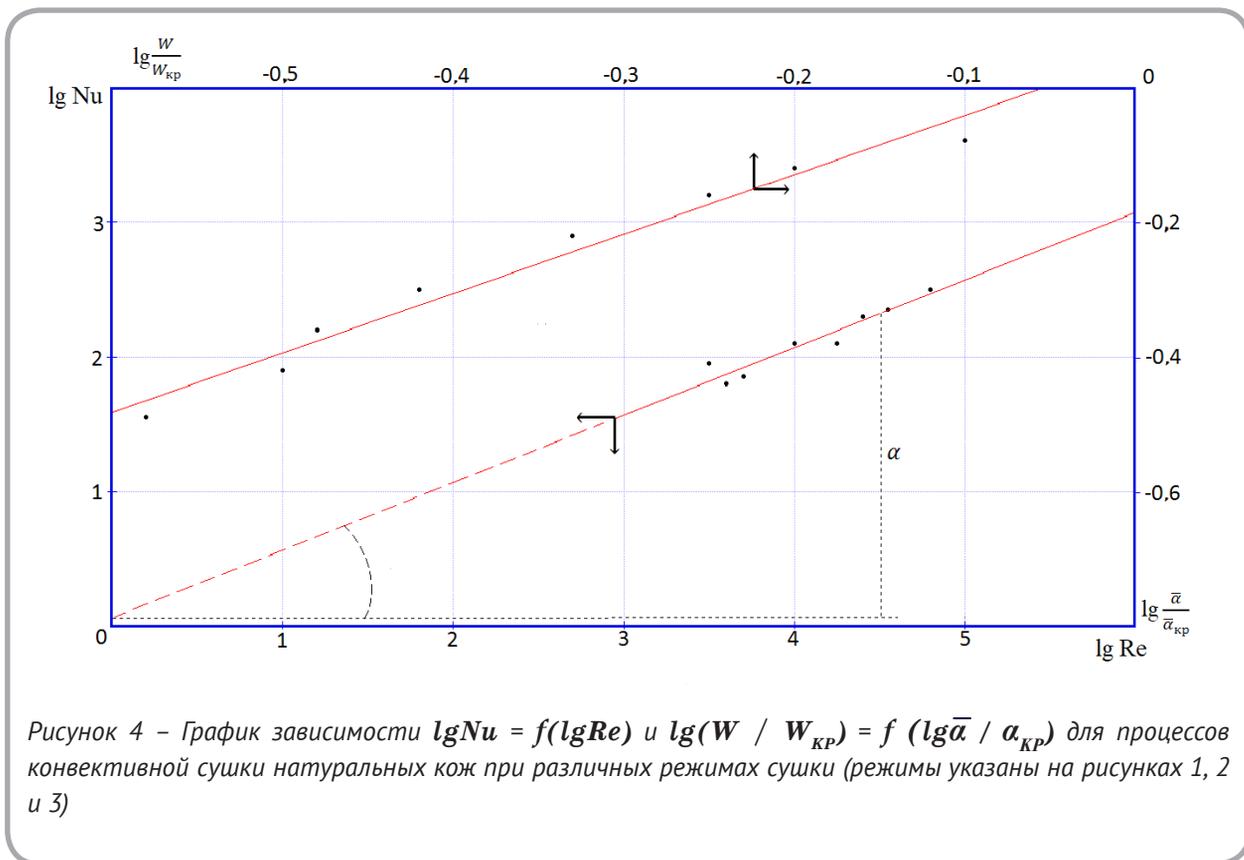


Таблица 1 – Зависимость коэффициента теплообмена  $\bar{\alpha}$  от влагосодержания красnodубной юфти в процессе конвективной сушки при различных режимах

$t_c, ^\circ C$	40	40	50	50	50	50	60	60	50
$\varphi, \%$	40	60	80	40	45	45	45	45	45
$v, м/с$	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	3	4	0,5	1
$W, \%$	Коэффициент теплообмена $\bar{\alpha}, Вт/м^2 \cdot ^\circ C$ , числитель (15), знаменатель (16)								
80	11,5	8,3	5,4	11,5	10,5	27,5	30	14,8	17,1
	10,4	9,4	4,6	10,8	9,5	25,4	28,6	12,6	16,7
70	11,2	8,1	5,8	11	10,8	27,3	30	14,7	17,1
	10,4	9,3	4,8	10,8	10,2	25,4	28,6	12,6	16,7
60	9,2	7,2	4,2	11,5	9,6	27	27	13,5	13,6
	9,6	8,3	3,8	10,3	10,5	25,2	27,2	11,8	14,2
50	8,8	6,5	3,9	9,6	8,9	25	24,5	10,9	12,8
	8,6	7,2	3,4	8,9	9,2	23,3	23,7	10,3	13,2
40	7,9	5,7	2,9	8,8	8,6	23	22,6	9,8	11,6
	7,3	6,2	2,7	7,7	8,4	21,2	20,3	8,8	11,2
30	7,3	5,8	2,5	7,8	7,2	19,5	18,4	8,4	9,8
	5,9	4,6	2,2	6,5	6,8	16,7	16,8	6,8	9,1
25	6,2	3,1	–	6,5	3,5	16	16,4	6,5	8,1
	5,2	3,9	–	5,4	3,9	13,8	14,7	6,1	7,9

В качестве примера приведем расчет  $\bar{\alpha}_{KP}$  для периода постоянной скорости сушки для красnodубной юфти по формулам (18) и (19) при режиме:  $t_c = 50 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  $v = 1 \text{ м/с}$ ;  $\varphi = 45 \text{ \%}$ ;  $\bar{u}_0 = 1,13$ ;  $\bar{u}_{KP} = 0,7$ . Экспериментальные данные по протоколу опыта. Пластина  $250 \times 150 \times 1,8 \text{ мм}$ ;  $t_{MT} = t_{II} = 35 \text{ }^\circ\text{C}$ ; скорость сушки в первом периоде  $N = 1,5 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}$ ; скорость изменения температуры  $d\bar{t} / d\bar{u} \approx 5 \text{ }^\circ\text{C}$  при переходе первого периода во второй. Поверхность пластины  $F = 0,0375 \text{ м}^2$ . Объем  $V = 0,0675 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$ . Количество удаляемой влаги  $G_{ВЛ} = 30,6 \cdot 10^{-3} \text{ кг}$ . Абсолютно сухой вес образца  $G_0 = 27 \cdot 10^{-3} \text{ кг}$ . Плотность образца юфти  $\rho_0 = G_0 / V = 27 \cdot 10^{-3} / 0,0675 \cdot 10^{-3} = 400 \text{ кг/м}^3$ . Удельная теплоемкость кожи  $c_0 \approx 1550 \text{ Дж/кг} \cdot \text{ }^\circ\text{C}$ .

Интенсивность испарения влаги [3]

$$j = N \cdot \rho_0 \cdot R_v = 1,5 \cdot 10^{-4} \cdot 400 \times 1,8 \cdot 10^{-3} \approx 1,08 \cdot 10^{-4} \text{ кг/м}^2 \cdot \text{с}. \quad (20)$$

Коэффициент теплообмена по формуле А. В. Лыкова

$$\bar{\alpha}_{KP} = \frac{((1550 + 4200) \cdot 5 + 2420 \cdot 10^3) \cdot 1,08 \cdot 10^{-4}}{50 - 35} = 17,6 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{ }^\circ\text{C}. \quad (21)$$

Коэффициент теплообмена  $\bar{\alpha}_{KP}$  по критериальному уравнению (19).

Для периода постоянной скорости сушки отношение  $(\bar{u} / \bar{u}_{KP})^{0,75} = 1$ .

Число Рейнольдса

$$Re = \frac{v \cdot l}{\nu_c} = \frac{1 \cdot 0,15}{17,8 \cdot 10^{-6}} = 8427. \quad (22)$$

Коэффициент теплообмена определяется по критериальному уравнению теплообмена для критерия Нуссельта [4]

$$Nu = 0,95 \cdot (8427)^{0,5} \cdot \left(\frac{323}{308}\right)^2 = 96,9. \quad (23)$$

Коэффициент теплообмена  $\bar{\alpha}_{KP}$  равен

$$\bar{\alpha}_{KP} = \frac{Nu \cdot \lambda_B}{l} = \frac{96,9 \cdot 2,83 \cdot 10^{-2}}{0,15} = 18,2 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{ }^\circ\text{C}. \quad (24)$$

Кинематическая вязкость и теплопроводность воздуха  $\nu_B$  и  $\lambda_B$  определяется по таблицам [4] при  $t_c = 50 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $l$  – длина образца кожи по набеганию потока. Плотность теплового потока в первом периоде по уравнению кинетики сушки

$$q_I = r \cdot \rho_0 \cdot R_v \cdot N = 2420 \cdot 10^{-3} \cdot 400 \times 1,8 \cdot 10^{-3} \cdot 1,5 \cdot 10^{-4} = 261 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{ }^\circ\text{C}. \quad (25)$$

Коэффициент теплообмена  $\bar{\alpha}_{KP}$  равен

$$\bar{\alpha}_{KP} = \frac{q_I}{t_c - t_{MT}} = \frac{261}{15} = 17,4 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{ }^\circ\text{C}. \quad (26)$$

Плотность потока тепла в первом периоде сушки по уравнению Ньютона

$$q_I = 18,2 \cdot (50 - 35) = 273 \text{ Вт/м}^2. \quad (27)$$

Погрешность при всех методах вычисления  $\bar{\alpha}_{KP}$  и теплового потока составила  $\Delta \approx 4,5 \text{ \%}$ .

Запишем основное уравнение кинетики сушки в виде [3, 8–10]

$$q^* = \frac{q_{II}}{q_I} = \frac{\bar{\alpha}(t_c - \bar{t})}{\bar{\alpha}_{KP}(t_c - t_{MT})} = \frac{\bar{\alpha}}{\bar{\alpha}_{KP}} \cdot \frac{\Delta t_{II}}{\Delta t_I} = N^* (1 + Rb), \quad (28)$$

где  $\Delta t_I$  и  $\Delta t_{II}$  – изменения температур в первом и втором периодах сушки.

Уменьшение коэффициента теплообмена  $\bar{\alpha}$  в периоде подающей скорости сушки выражается соотношением [3, 8, 10]

$$\frac{\bar{\alpha}}{\bar{\alpha}_{KP}} = \left( \frac{\bar{u}}{\bar{u}_{KP}} \right)^n \quad (29)$$

Для процессов сушки всех видов натуральных кож  $n = 0,75$ .

На рисунке 5 дана обработка эксперимента для зависимости  $\Delta t_{II} / \Delta t_I = f(\bar{u} / \bar{u}_{KP})$ , которая приближенно аппроксимируется уравнением, справедливым для всех видов кож

$$\frac{\Delta t_{II}}{\Delta t_I} = \left( \frac{\bar{u}}{\bar{u}_{KP}} \right)^{0,45} \quad (30)$$

На основании уравнений (28), (29) и (30) имеем

$$\begin{aligned} q_{II} &= q_I \left( \frac{\bar{u}}{\bar{u}_{KP}} \right)^{0,75} \cdot \left( \frac{\bar{u}}{\bar{u}_{KP}} \right)^{0,45} = \\ &= q_I \left( \frac{\bar{u}}{\bar{u}_{KP}} \right)^{1,2} = r \cdot \rho_\theta \cdot R_v \cdot N \left( \frac{\bar{u}}{\bar{u}_{KP}} \right)^{1,2} \quad (31) \end{aligned}$$

Из [10], с учетом числа Рейндера следует

$$\frac{Nu}{Nu_{KP}} = \frac{\bar{\alpha}}{\bar{\alpha}_{KP}} = N^{*0,57} \cdot (1 + Rb) \quad (32)$$

где  $Nu_{KP}$  – критерий Нуссельта в первом периоде.

Учитывая соотношения (29) можно записать

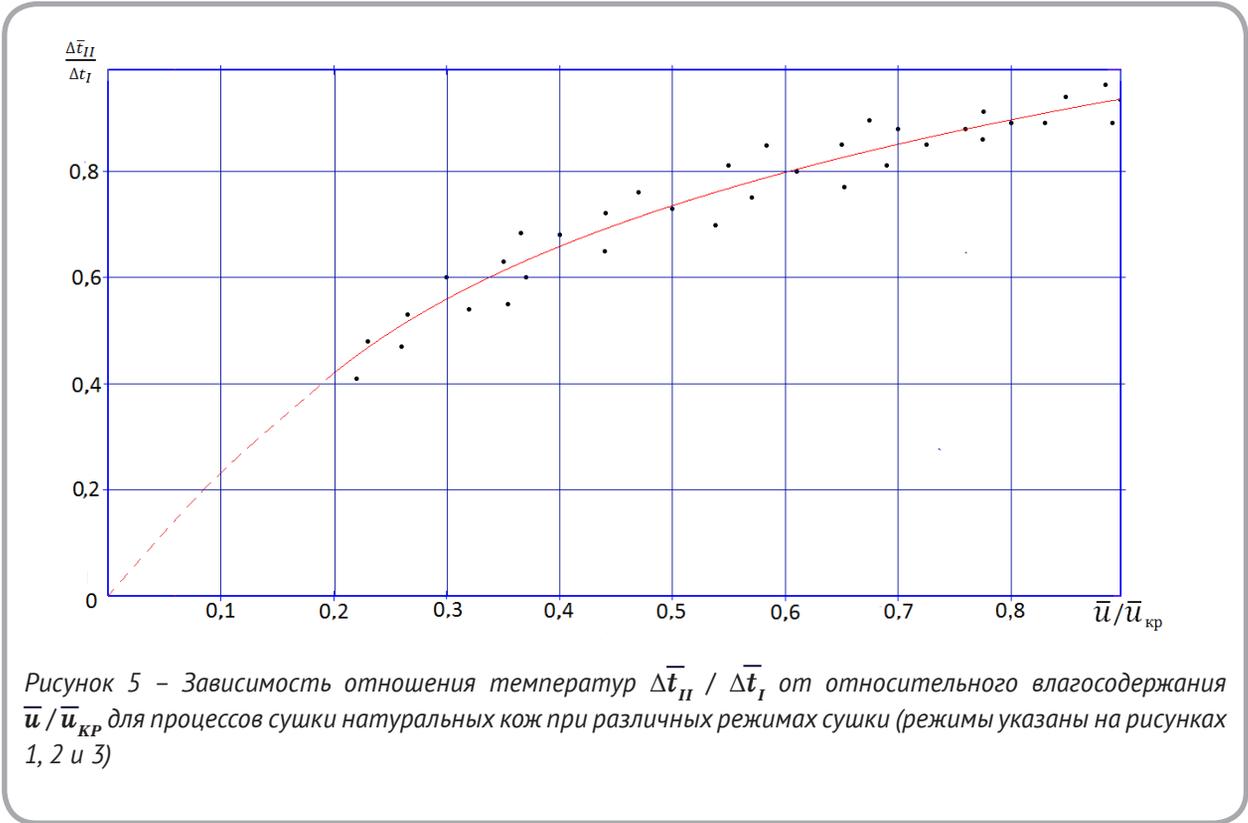
$$\left( \frac{\bar{u}}{\bar{u}_{KP}} \right)^{0,75} = N^{*0,57} \cdot (1 + Rb) \quad (33)$$

Тогда относительная скорость сушки  $N^*$  равна

$$N^* = \frac{1}{(1 + Rb)} \cdot \left( \frac{\bar{u}}{\bar{u}_{KP}} \right)^{1,3} \quad (34)$$

Подставляя в (28) получим

$$q_{II} = q_I \left( \frac{\bar{u}}{\bar{u}_{KP}} \right)^{1,3} = r \cdot \rho_\theta \cdot R_v \cdot N \left( \frac{\bar{u}}{\bar{u}_{KP}} \right)^{1,3} \quad (35)$$



Уравнение (32) получено при обработке большого числа экспериментов по сушке более 13 наименований различных материалов, а (31) обработкой эксперимента по конвективной сушке различных видов натуральных кож. Следует отметить, что конвективная сушка натуральной кожи проходит при мягких режимах ( $t_c = 30-60$  °С), скоростях воздуха  $v = 0,5-1,5$  м/с и высоких относительных влагосодержаниях воздуха  $\varphi$  ( $\varphi \cong 40-80$  %). При таких условиях сушки процессы являются малоинтенсивными.

Пример. Приведем расчет значений плотностей тепловых потоков для второго периода сушки по формулам (31) и (35) для режима сушки красnodубной юфти. Режим сушки:  $t_c = 50$  °С;  $v = 1$  м/с;  $\varphi = 55$  %;  $u_0 = 1,13$ ;  $u_{KP} = 0,7$ ;  $u_o = 0,7$ ;  $u_p = 0,12$ ;  $N = 1,5 \cdot 10^{-4}$  с<sup>-1</sup>;  $q_I = r \cdot \rho_0 \cdot R_v \cdot N = 2420 \cdot 10^3 \cdot 400 \cdot 1,8 \cdot 10^{-3} \cdot 1,5 \cdot 10^{-4} \approx 261$  Вт/м<sup>2</sup>.

Максимальная погрешность в значениях тепловых потоков, вычисленных по формулам (31), (35) составляет около 8 % только при влагосодержаниях близких к равновесным, но находится в пределах точности проведения эксперимента.

Обозначим  $d\bar{t} / d\tau$  через  $b'$  и запишем уравнение (1) в форме

$$b' = \frac{d\bar{t}}{d\tau} = m_t (t_c - \bar{t}), \quad (36)$$

где  $b'$  – скорость изменения температуры во втором периоде сушки за единицу времени, определяемая графическим дифференцированием температурной кривой  $\bar{t} = f(\tau)$ . На рисунке 6

изображены зависимости  $b' = m_t \cdot (t_c - \bar{t}) = f(\bar{u} / \bar{u}_{KP})$ , полученные обработкой эксперимента по сушке рантовой подошвы, красnodубной юфти и хромового опоека при различных режимах. Эти зависимости приближенно аппроксимируются уравнением

$$b' = d\bar{t} / d\tau = m_t (t_c - \bar{t}) = D \cdot \left( \frac{\bar{u}}{\bar{u}_{KP}} \right)^{0,45} \quad (37)$$

Обработкой опытных данных получены значения параметра  $D$  (°С/с), которые определяются видом натуральной кожи и не зависят от режима сушки: рантовая подошва –  $D_{РАНТ} = 6 \cdot 10^{-4}$ ; красnodубная юфть –  $D_{ЮФТЬ} = 4,6 \cdot 10^{-4}$ ; хромовый опоек –  $D_{ОП} = 1 \cdot 10^{-4}$ .

Решением уравнения (37) вычисляется среднеинтегральная температура кожи во втором периоде сушки

$$\bar{t} = t_c - \frac{D}{m_t} \left( \frac{\bar{u}}{\bar{u}_{KP}} \right)^{0,45}, \quad (38)$$

где  $m_t$  – темп нагрева, с<sup>-1</sup>.

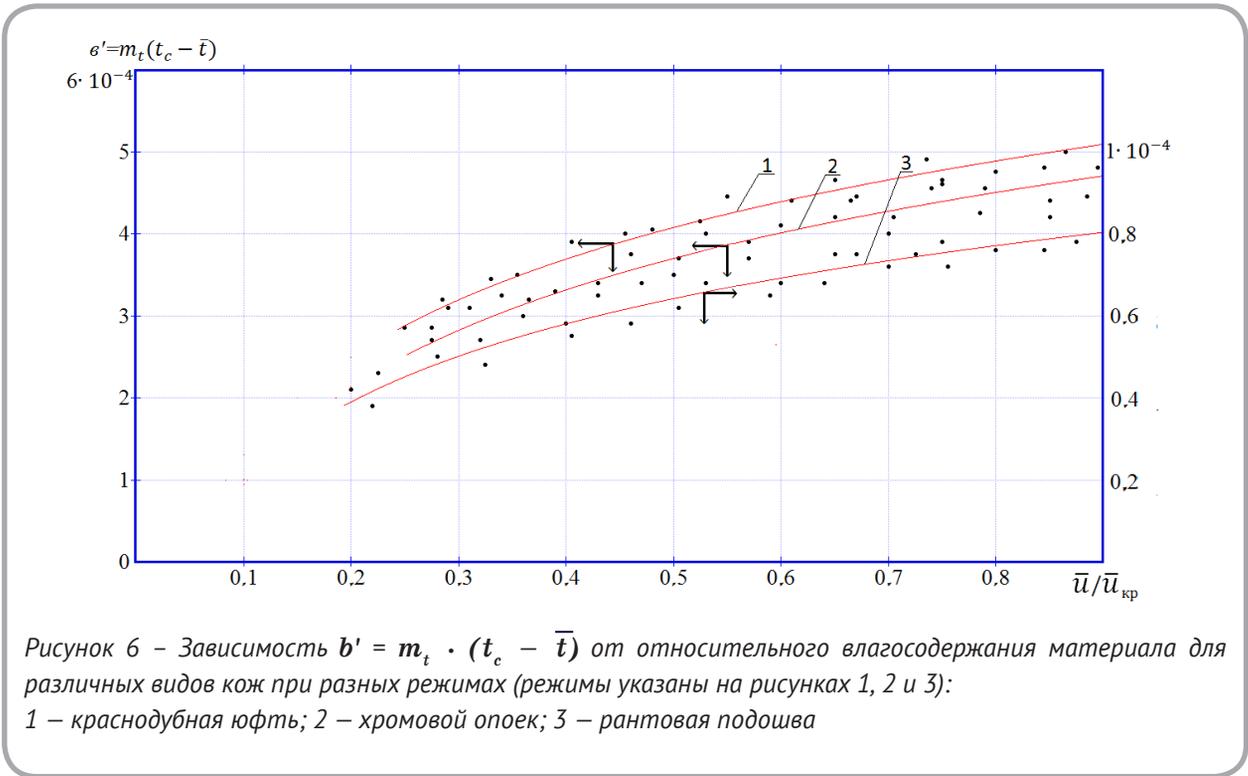
Подставляем (30) в (37), получим

$$m_t \cdot (t_c - \bar{t}) = D \frac{\Delta t_{II}}{\Delta t_I} = D \frac{t_c - \bar{t}}{t_c - t_{MT}} \quad (39)$$

После простых преобразований получим выражение для определения температуры мокрого термометра

Таблица 2 – Результаты расчета значений плотностей тепловых потоков для второго периода сушки для режима сушки красnodубной юфти

$\bar{u}$	0,65	0,6	0,5	0,4	0,35	0,3	0,25
$\bar{u} / \bar{u}_{KP}$	0,928	0,875	0,714	0,571	0,5	0,428	0,375
$q_{II}$ Вт/м <sup>2</sup> (31)	238,4	216,5	143,6	109,4	92,8	77,3	61,6
$q_{II}$ Вт/м <sup>2</sup> (35)	236,8	213,6	139,4	105,2	87,7	71,6	56,8
$\Delta$ , % разбежка	0,84	0,93	2,8	3,6	5,3	6,5	7,9



$$t_{MT} \approx t_{II} \approx t_c - \frac{D}{m_t} \quad (40)$$

В качестве примера вычислим температуру  $t_{MT}$  для процесса сушки красnodубной юфти при режиме:  $t_c = 50 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  $v = 1 \text{ м/с}$ ;  $\varphi = 45 \%$ ;  $t_{MT} \approx t_n = 35 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  $\bar{u}_o = 0,12$ ;  $\bar{u}_{KP} = 0,7$ ;  $m_t = 2,94 \cdot 10^{-5} \text{ с}^{-1}$ ;  $D = 4,6 \cdot 10^{-4} \text{ }^\circ\text{C/с}$ .

Расчетное значение

$$t_{MT} \approx t_{II} \approx 50 - \frac{4,6 \cdot 10^{-4}}{2,94 \cdot 10^{-5}} = 34,4 \text{ }^\circ\text{C}. \quad (41)$$

Для процесса сушки рантовой подошвы при режиме:  $t_c = 50 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  $v = 0,5 \text{ м/с}$ ;  $\varphi = 45 \%$ ;  $\bar{u}_{KP} = 0,6$ ;  $u_p = 0,1$ ;  $t_{MT\text{экс}} = 34 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  $m_t = 3,7 \cdot 10^{-5} \text{ с}^{-1}$ .

$$t_{MT} = 50 - \frac{6 \cdot 10^{-4}}{3,7 \cdot 10^{-5}} = 33,8 \text{ }^\circ\text{C}. \quad (42)$$

Совпадение расчетных значений  $t_{MT}$  с экспериментальными вполне удовлетворительное. Представляет интерес использовать в расчетах

кинетики сушки результаты аналитических решений уравнений теплопереноса. Для бесконечной неограниченной пластины при граничных условиях третьего рода, нагреваемой в среде  $t_c = \text{const}$ , когда теплообмен между ограничивающими поверхностями пластины с окружающей средой происходит по закону Ньютона, при значениях теплообменного критерия  $Bi < 1$  А. В. Лыковым [5] получено уравнение для избыточной температуры на поверхности материала

$$\bar{\theta}_{II} = \frac{t_{II} - t_H}{t_c - t_H} = 1 - \cos \sqrt{Bi} \cdot \exp(-Bi \cdot Fo) \quad (43)$$

Учитывая, что  $Bi \cdot Fo = m_t \tau_{II}$  уравнение (43) примет вид

$$\theta_{II} = 1 - \cos \sqrt{Bi} \cdot \exp(-m_t \tau_{II}) \quad (44)$$

Начальной температурой отсчета для второго периода сушки является температура в периоде постоянной скорости сушки  $t_{MT} \approx t_{II}$ . В малоинтенсивных процессах сушки при нагреве тонких

плоских влажных тел при  $t_c = const$  и отсутствии в материале термического переноса вещества градиентом температуры по сечению тела можно пренебречь, и температуру  $\theta_{II}$  можно без большой погрешности заменить на среднеинтегральную  $\bar{\theta}(t_{II} \approx \bar{t})$  [6, 9]. Анализ большого числа экспериментов на конвективной сушке различных видов натуральной кожи [1, 2] показал, что перепад температуры по сечению влажного материала не превышает  $\Delta t \approx 2-4$  °С и зависит от толщины кожи.

Принимая приближенно  $\theta_{II} \approx \bar{\theta}$ , расчетное уравнение запишем в виде

$$\bar{\theta} = \frac{\bar{t} - t_{MT}}{t_c - t_{MT}} = 1 - \cos \sqrt{Bi} \cdot \exp(-m_t \tau_{II}) . \quad (45)$$

Среднеинтегральная температура определяется выражением

$$\bar{t} = t_{MT} + (t_c - t_{MT}) \cdot \bar{\theta} . \quad (46)$$

В таблице 3 дано сравнение расчетных значений среднеинтегральных температур, вычисленных по уравнениям (5), (15) и (32), с экспериментом для процесса сушки красnodубной юфти при режиме  $t_c = 50$  °С;  $v = 1$  м/с;  $\varphi = 45$  %. При вычислении величины критерия  $Bi$  необходимы

достоверные зависимости коэффициента теплопроводности влажной кожи от влагосодержания и температуры материала. С использованием данных, приведенных в [1, 2], по коэффициенту теплопроводности влажных кож и формулы В. И. Дубницкого [3]

$$\lambda_w = \lambda_0 + A_0 \bar{t} \cdot \bar{u} \cdot \exp(-B\bar{u}) , \quad (47)$$

была проведена обработка этих данных. В результате зависимость коэффициента  $\lambda_w$  от температуры и влагосодержания

$$\lambda_w = \lambda_0 + 1,31 \cdot 10^{-3} \cdot \bar{t} \cdot \bar{u} \cdot \exp(\bar{u}) . \quad (48)$$

Коэффициент  $B$  для натуральных кож принимает положительные значения и равен  $B = 1$ . Теплопроводность абсолютно сухой кожи равна: рантовая подошва –  $\lambda_0 = 0,120$ ; красnodубная юфть –  $\lambda_0 = 0,105$ ; опоек хромового дубления –  $\lambda_0 = 0,055$ ; юфть танидного дубления –  $\lambda_0 = 0,115$  Вт/м · °С.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе метода теории регулярного режима проведено исследование кинетики теплообмена для процессов сушки различных видов натуральной кожи. Получены уравнения для опреде-

Таблица 3 – Сравнение экспериментальных значений среднеинтегральных температур с расчетными, вычисленными по уравнениям (5), (10), (15), (38), (44), для процесса конвективной сушки красnodубной юфти в режиме сушки  $t_c = 50$  °С;  $v = 1$  м/с;  $\varphi = 45$  %

$\bar{u}$	$\bar{\alpha},$ Вт/м <sup>2</sup> · °С	$\lambda_w,$ Вт/м <sup>2</sup> · °С	$Bi$	$\tau_{II}$ мин	$\bar{t},$ °С (5), (10)	$\bar{t},$ °С (15)	$\bar{t},$ °С (38)	$\bar{\theta}$ (44)	$\bar{t},$ °С (44)	$\bar{t},$ °С эксп.
0,6	13,6	0,170	0,143	12,5	35,4	35,4	35,4	0,086	36,3	35,6
0,5	12,8	0,159	0,144	22,2	35,9	36,2	36,6	0,105	36,7	35,9
0,4	11,6	0,148	0,141	38,2	36,6	37,5	37,8	0,128	36,9	36,8
0,35	10,5	0,143	0,132	55,4	37,0	38,2	38,0	0,135	37,2	37,2
0,3	9,7	0,139	0,126	77,3	37,3	39,4	38,8	0,146	37,5	38,5
0,25	8,1	0,135	0,115	98,8	38,2	–	39,8	0,195	38,3	38,6

Примечание: пластина юфти: 250×150×1,8 мм;  $\bar{u}_0 = 1,13$ ;  $\bar{u}_{KP} \approx 0,7$ ;  $\bar{u}_p = 0,12$ ;  $t_{MT} \approx t_{II} = 35$  °С;  $\rho_0 = 400$  кг/м<sup>3</sup>;  $c_0 = 1,55$  кДж/кг · °С;  $\lambda_0 = 0,115$  Вт/м · °С;  $m_t = 1,76 \cdot 10^{-3}$  мин<sup>-1</sup>.

ления плотности тепловых потоков и среднеинтегральных температур в периоде убывающей скорости сушки. Установлена зависимость для темпа нагрева натуральных кож. Представлены примеры расчета параметров сушки по приведенным уравнениям. Дана проверка достоверности полученных уравнений и сопоставление расчетных значений температур с экспериментом. Получено приближенное уравнение для вычисления теплового потока без определения коэффициента теплообмена. Рассмотрена возможность применения для расчета среднеинтегральной температуры результата аналитических решений уравнений теплопереноса.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Кавказов, Ю. Л. (1973), *Тепло- и массообмен в технологии кожи и обуви*, Москва, Легкая индустрия, 272 с.
2. Лыков, А. В. (1938), *Кинетика и динамика процессов сушки и увлажнения*, Москва, Гизлегпром, 776 с.
3. Лыков, А. В. (1968), *Теория сушки*, Москва, Энергия, 590 с.
4. Рудобашта, С. П. (2010), *Теплотехника*, Москва, Колосс, 599 с.
5. Лыков, А. В. (1967), *Теория теплопроводности*, Москва, Высшая школа, 600 с.
6. Лыков, А. В., Михайлов, Ю. А. (1963), *Теория тепло- и массопереноса*, Москва–Ленинград, Госэнергоиздат, 535 с.
7. Ольшанский, А. И. (2014) Регулярный тепловой режим нагревания влажных плоских капиллярпористых материалов в процессе их сушки, *Инженерно-физический журнал*, 2014, Т. 87, № 6, С. 1308–1318.
8. Сажин, Б. С. (1984), *Основы техники сушки*,

#### REFERENCES

1. Kavkazov, Yu. L. (1973), *Teplo- i massoobmen v tehnologii kozhi i obuvi* [Heat and mass transfer in the technology of leather and shoes], Moscow, Light Industry, 272 p.
2. Lykov, A. V. (1938), *Kinetika i dinamika processov sushki i uvlazhnenija* [Kinetics and dynamics of drying and moistening processes], Moscow, Gizlegprom, 776 p.
3. Lykov, A. V. (1968), *Teorija sushki* [Theory of drying], Moscow, Jenergiya, 590 p.
4. Rudobashta, S. P. (2010), *Teplotehnika* [Heat engineering], Moscow, Koloss, 599 p.
5. Lykov, A. V. (1967), *Teorija teploprovodnosti* [Theory of heat conduction], Moscow, Vysshaja shkola, 600 p.
6. Lykov, A. V., Mihajlov, Ju. A. (1963), *Teorija teplomassoperenosa* [Heat and Mass Transfer Theory], Moscow–Leningrad, Gosjenergoizdat, 535 p.
7. Alshanski, A. I. (2014), Regular thermal mode of heating of wet flat capillary-porous materials during their drying [Reguljarnyj teplovoj rezhim nagrevanija vlazhnyh ploskih kapilljaroporistyh

Москва, Химия, 320 с.

9. Акулич, П. В. (2010), *Расчеты сушильных и теплообменных установок*, Минск, Белорусская наука, 443 с.
10. Лыков, А. В., Куц, П. С., Ольшанский, А. И. (1972), Кинетика теплообмена в процессе сушки влажных материалов, *Инженерно-физический журнал*, 1972, Т. 23, № 3, С. 401–406.
11. Ольшанский, А. И. (2014) Исследование теплообмена в процессе сушки влажных материалов по экспериментальным данным влагообмена, *Инженерно-физический журнал*, 2014, Т. 87, № 4, С. 887–897.
- materialov v processe ih sushki], *Inzhenerno-fizicheskij zhurnal – Engineering and Physics Journal*, 2014, Т. 87, № 6, pp. 1308–1318.
8. Sazhin, B. S. (1984), *Osnovy tehniki sushki* [Basics of drying technique], Moscow, Himija, 320 p.
9. Akulich, P. V. (2010), *Raschety sushil'nyh i teploobmennyh ustanovok* [Calculations of drying and heat exchangers], Minsk, Belarusian science, 443 p.
10. Lykov, A. V., Kuts, P. S., Alshanski, A. I. (1972), Kinetics of heat transfer in the process of drying wet materials [Kinetika teploobmena v processe sushki vlazhnyh materialov], *Inzhenerno-fizicheskij zhurnal – Engineering and Physics Journal*, 1972, Т. 23, № 3, pp. 401–406.
11. Alshanski, A. I. (2014), The study of heat transfer in the process of drying wet materials on the basis of experimental data of moisture exchange [Issledovanie teploobmena v processe sushki vlazhnyh materialov po jeksperimental'nym dannym vlagoobmena], *Inzhenerno-fizicheskij zhurnal – Engineering and Physics Journal*, 2014, Т. 87, № 4, pp. 887–897.

Статья поступила в редакцию 26. 03. 2018 г.