

А. И. Ольшанский, А. М. Гусаров, С. В. Жерносек

Витебский государственный технологический университет, Витебск, Республика Беларусь

ТЕПЛОМАССОБМЕН В ПРОЦЕССЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ И СУШКИ НАТУРАЛЬНЫХ КОЖ ПРИ КОНВЕКТИВНОМ МЕТОДЕ ЭНЕРГОПОДВОДА

Аннотация. Рассмотрена возможность использования результатов аналитических решений дифференциальных линейных уравнений нестационарной теплопроводности с постоянными коэффициентами теплопереноса для расчета температуры материала при термической обработке кож. Термическая обработка натуральных кож как термочувствительных материалов проводится при мягких температурных режимах и высоком влагосодержании воздуха, при этом температура не претерпевает значительных изменений, а коэффициенты теплопереноса изменяются практически линейно. При использовании аналитических решений принималось, что при малых градиентах температуры по сечению тонкого тела термическим переносом вещества можно пренебречь и при значениях тепломассообменных критериев Био меньше единицы главным фактором, лимитирующим тепломассоперенос, является взаимодействие поверхности испарения тела с окружающей средой, и в решении дифференциального уравнения теплопроводности можно ограничиться одним первым членом бесконечного ряда. При этом была применена кусочно-ступенчатая аппроксимация всех теплофизических характеристик с постоянными значениями этих коэффициентов на расчетных временных интервалах, что позволяло учитывать изменение коэффициентов переноса на протяжении всего процесса термической обработки. Обработка опытных данных показала, что в малоинтенсивных процессах при достоверных значениях коэффициентов переноса в расчетах теплопереноса возможно использовать результаты решений дифференциальных уравнений нестационарной теплопроводности. Результаты исследования теплообмена при сушке кож подтверждают закономерности изменения температуры, установленные экспериментальным путем. Совместно с экспериментальными исследованиями процессов сушки аналитические исследования имеют большое практическое значение при разработке новых методов расчета тепломассопереноса во влажных телах.

Ключевые слова: влагосодержание, температура, скорость термической обработки, коэффициент сушки, критерий Био, теплопроводность

Для цитирования: Ольшанский, А. И. Тепломассообмен в процессе термической обработки и сушки натуральных кож при конвективном методе энергоподвода / А. И. Ольшанский, А. М. Гусаров, С. В. Жерносек // Вест. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. физ.-техн. наук. – 2021. – Т. 66, № 1. – С. 84–92. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2021-66-1-84-92>

Anatolii I. Ol'shanskii, Aleksei M. Gusarov, Sergei V. Zhernosek

Vitebsk State Technological University, Vitebsk, Republic of Belarus

HEAT AND MASS TRANSFER IN THE PROCESS OF HEAT TREATMENT AND DRYING OF NATURAL LEATHER WITH THE CONVECTIVE METHOD OF ENERGY SUPPLY

Abstract. In the work, the authors investigated the possibility of using the results of analytical solutions of the linear differential equations of unsteady heat conduction with constant heat transfer coefficients to calculate the temperature of the material during heat treatment of leathers. Heat treatment of natural leathers as heat-sensitive materials is carried out under mild temperature conditions and high air moisture contents, the temperature does not undergo significant changes, and the heat transfer coefficients change almost linearly. When using analytical solutions, the authors made the assumptions that for small temperature gradients over the cross section of a thin body, the thermal transfer of matter can be neglected and for values of the heat and mass transfer Biot criteria less than unity, the main factor, limiting heat and mass transfer, is the interaction of the evaporation surface of the body with the environment; so, in solving the differential heat equation we can restrict ourselves to one first member of an infinite series. In this case, a piecewise stepwise approximation of all thermophysical characteristics with constant values of these coefficients at the calculated time intervals was applied, which made it possible to take into account the change in the transfer coefficients throughout the entire heat treatment process. Processing of experimental data showed that in low-intensity processes with reliable values of the transfer coefficients, it is possible to use the results of solutions of differential equations of unsteady heat conduction in heat transfer calculations. The results of the study of heat transfer during drying of leather confirm the laws of temperature change established experimentally. Together with experimental studies of drying processes, analytical studies are of great practical importance in the development of new methods for calculating heat and mass transfer in wet bodies.

Keywords: moisture content, temperature, heat treatment rate, drying coefficient, Biot criterion, thermal conductivity

For citation: Ol'shanskii A. I., Gusarov A. M., Zhernosek S. V. Heat and mass transfer in the process of heat treatment and drying of natural leather with the convective method of energy supply. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2021, vol. 66, no. 1, pp. 84–92 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2021-66-1-84-92>

Введение. Натуральная кожа является очень сложным материалом, неоднородным как по толщине, так и в отношении своих физико-механических и теплофизических показателей, при этом после операции дубления и превращения шкуры в промышленную кожу резко изменяются теплофизические характеристики, присущие шкуре [1–3]. В процессе термической обработки и сушки кожа подвергается воздействию теплоносителя различной температуры, относительной влажности воздуха и скорости движения. Влияние всех этих факторов на процесс имеет важное значение, особенно при выборе рационального режима, поскольку сушка является технологическим процессом, в котором кожа приобретает окончательные кондиционные свойства. Основными препятствиями для быстрой термической обработки кожи при повышенных температурах являются усадка, коробление и разрушение структуры материала. Поэтому натуральные кожи обрабатываются при мягких температурных режимах теплоносителя $t_c \approx 30\text{--}60^\circ\text{C}$, скорости движения $v = 0,5\text{--}2,0$ м/с и высоком влагосодержании воздуха $\varphi \approx 35\text{--}80\%$ [1–3].

В связи с широким применением компьютерной техники и развитием аналитических методов решения систем дифференциальных уравнений становится возможным в той или иной степени использовать результаты этих решений для расчета теплопереноса в реальных условиях сушки. Основная проблема заключается в определении достоверных значений коэффициентов переноса и их зависимости от влагосодержания и температуры. При известных коэффициентах переноса для расчета процесса сушки достаточно эффективно можно использовать результаты решений дифференциальных уравнений теплопереноса [4–6].

Существует много приближенных методов расчета тепломассообмена в процессах сушки, основанных на анализе наиболее общих закономерностей процесса [1, 2, 4]. Наиболее перспективными методами исследования являются методы, позволяющие обобщать опытные данные совместно с аналитическими решениями [4–6].

Цель настоящего исследования – изучение возможности использования в расчетах температуры при тепловой обработке тонких влажных материалов результатов аналитических решений дифференциальных уравнений теплопереноса.

Постановка задачи. Аналитические методы расчета тепломассопереноса представляют интерес для практики сушки конкретных материалов наряду с экспериментальными методами.

Для ряда материалов с известными коэффициентами переноса возможно использовать результаты аналитических решений дифференциальных уравнений для расчета основных параметров кинетики сушки. В совокупности с экспериментальными методами исследования это позволяет установить рациональные режимы и более полно обобщать опытные данные [1–4].

Интенсифицировать тепломассоперенос при тепловой обработке тонких материалов возможно ужесточением температурного режима, если это не приводит к снижению качества высушенного материала [1, 2, 4].

Для тонких материалов тепломассообменные критерии Био Bi и Bi_m в реальных условиях сушки зависят друг от друга и их численные значения имеют приблизительно один порядок [5]. При малых числах Bi и Bi_m лимитирующим фактором является внешний тепломассообмен поверхности материала с окружающей средой, скорость сушки слабо зависит от внутреннего массообмена и термодиффузионное сопротивление практически не влияет на кинетику сушки [4–6]. Если термическая обработка тонких плоских капиллярно-пористых влажных материалов протекает при $Bi < 1$ и малых градиентах температуры по сечению тонкого тела, а фазовым переносом вещества можно пренебречь, то с допустимым приближением можно принять, что испарение влаги из материала происходит у поверхности влажного тела (внешняя задача) [4–7]. Скорость тепловой обработки в этом случае, определяется только внешними условиями тепломассообмена поверхности испарения тела с окружающей средой [2, 4, 5]. С уменьшением среднего влагосодержания \bar{u} по объему материала, когда $\bar{u} < \bar{u}_{кр}$ и средняя температура тела

увеличивается $\bar{t} > t_{м.т}$ ($\bar{u}_{кр}$ – критическое влагосодержание, соответствующее переходу первого периода сушки во второй; \bar{t} – среднеинтегральная температура материала; $t_{м.т}$ – температура мокрого термометра), начинается второй период сушки, протекающий в условиях регулярного теплового режима [2, 4, 5].

Условия термической обработки и сушки. Неограниченная влажная тонкая пластина толщиной $\delta = 2R$ с начальной температурой $t_n = t_{м.т}$ находится в среде с температурой $t_c > t_n$, в которой материал проходит тепловую обработку обезвоживания. Теплообмен между поверхностями пластины и окружающей средой происходит по закону Ньютона. Дифференциальное линейное уравнение нестационарного теплопереноса для влажной пластины, когда испарение влаги происходит только у поверхностей (внутренние стоки тепла и фазовое превращения отсутствуют), имеет вид [5–9]

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 t}{\partial x^2}.$$

Граничные условия:

$$\begin{aligned} x = 0; \quad \frac{\partial t}{\partial x} &= 0, \\ x = \pm R; \quad \frac{\partial t}{\partial x} - \frac{\bar{\alpha}}{\lambda_{вл}}(t_c - t) - \frac{\rho r R}{\lambda_{вл}} \frac{d\bar{u}}{d\tau} &= 0, \end{aligned}$$

где a – коэффициент температуропроводности материала, $\bar{\alpha}$ – средний коэффициент теплоотдачи по поверхности пластины, ρ – плотность материала, r – теплота парообразования, $\lambda_{вл}$ – коэффициент теплопроводности влажного материала.

Скорость термической обработки и сушки определяется выражением [2, 4, 6]

$$\left| \frac{d\bar{u}}{d\tau} \right| = K(\bar{u} - u_p), \quad (1)$$

где u_p – равновесное влагосодержание материала, K – коэффициент сушки.

Интегрируя (1) для периода убывающей скорости сушки, получим

$$\frac{\bar{u} - u_p}{\bar{u}_{кр} - u_p} = \exp(-K\tau_{II}), \quad (2)$$

где τ_{II} – время сушки во втором периоде, отсчитываемое от нуля.

Решение (2) определяет длительность процесса во втором периоде [6, 7]:

$$\tau_{II} = \frac{1}{K} \ln \frac{\bar{u} - u_p}{\bar{u}_{кр} - u_p}. \quad (3)$$

Из решения дифференциального уравнения теплопроводности с заданными краевыми условиями, при постоянных термических коэффициентах, равных средним их значениям, учитывающими условия тепловой обработки, методом разделения переменных для температуры в середине пластины для второго периода получено [6]

$$\theta_{II} = \frac{t_{II} - t_{м.т}}{t_c - t_{м.т}} = 1 - \frac{A}{1 - \frac{Kc_{вл}\rho R}{\bar{\alpha}}} \exp(-K\tau_{II}), \quad (4)$$

где $c_{вл}$ – удельная теплоемкость влажного тела.

Поскольку термическая обработка плоских тонких влажных материалов протекает при числе Био $Bi < 1$, то уравнение (4) представлено первым членом ряда в бесконечной сумме ряда, представляющих аналитическое решение линейной задачи нестационарной теплопроводности [5, 6].

В процессе сушки влагосодержание материала уменьшается, поэтому термические коэффициенты $\lambda_{вл}$, $c_{вл}$ и a также изменяются. Наибольшее изменение претерпевает коэффициент теплопроводности $\lambda_{вл}$. Коэффициент температуропроводности a изменяется незначительно, поскольку

ку с уменьшением $\lambda_{\text{вл}}$ одновременно уменьшается произведение $c_{\text{вл}}\rho$ примерно с такой же скоростью [5, 6]. Коэффициент теплообмена $\bar{\alpha}$ также уменьшается со снижением влагосодержания влажного тела. Теплообменный критерий Био $Bi = \bar{\alpha}R/\lambda_{\text{вл}}$ изменяется мало, так как с уменьшением $\bar{\alpha}$ уменьшается одновременно и $\lambda_{\text{вл}}$, однако скорости их изменения различны [4].

В малоинтенсивных процессах термической обработки натуральных кож, сушка которых протекает при мягких температурных режимах $t_c \approx 30\text{--}60^\circ\text{C}$ и высоких относительных влагосодержаниях воздуха $\varphi \approx 35\text{--}80\%$, температура не претерпевает значительных изменений за малые промежутки времени. В этих условиях коэффициент теплопроводности влажной кожи $\lambda_{\text{вл}}$ является функцией только влагосодержания материала. Закономерности изменения $\lambda_{\text{вл}} = f(\bar{u})$ достаточно хорошо изучены при сушке натуральных кож [1, 3].

Уравнение (4) будет справедливо, когда коэффициент сушки K меньше параметра $Z = \frac{\bar{\alpha}}{c_{\text{вл}}\rho R}$, где Z – скорость изменения температуры в центре пластины. Коэффициент сушки определяется выражением [2, 4, 7]

$$K = \frac{N}{\bar{u}_{\text{кр}} - u_p},$$

где N – скорость сушки в первом периоде.

Параметр A в уравнении (4) для второго периода выражается зависимостью [6]

$$A = \frac{Kr(\bar{u}_{\text{кр}} - u_p)R\rho}{\bar{\alpha}(t_c - t_{\text{м.т}})}. \quad (5)$$

Температура в центре пластины определяется из уравнений (2), (4) и (5) при $K < Z$. Решение имеет вид [6]

$$t_{\text{ц}} = t_c - \frac{rRK\rho}{\bar{\alpha} - Kc_{\text{вл}}\rho R}(\bar{u} - u_p); \quad \bar{u} < \bar{u}_{\text{кр}}. \quad (6)$$

Уравнения (5) и (6) можно упростить, если воспользоваться параметром Z . Знаменатель уравнений (5) и (6) умножим и разделим на $c_{\text{вл}}\rho R$ и тогда получим:

$$A = \frac{Kr(\bar{u}_{\text{кр}} - u_p)}{c_{\text{вл}}Z(t_c - t_{\text{м.т}})}, \quad (7)$$

$$t_{\text{ц}} = t_c - \frac{rK}{c_{\text{вл}}(Z - K)}(\bar{u} - u_p). \quad (8)$$

Теплота парообразования r определяется по таблицам [4]. На основании экспериментальных данных по конвективной тепловой обработке различных тонких материалов величина $\frac{rK}{c_{\text{вл}}(Z - K)}$ зависит от температуры воздуха, почти не зависит от скорости его движения и изменяется с толщиной образцов [6].

Уравнение (4) на основании уравнения (7) приводится к виду

$$\theta_{\text{ц}} = \frac{t_{\text{ц}} - t_{\text{м.т}}}{t_c - t_{\text{м.т}}} = 1 - \frac{A}{\left(1 - \frac{K}{Z}\right)} \exp(-K\tau_{\text{ц}}), \quad (9)$$

где $\theta_{\text{ц}}$ – относительная температура в центре пластины.

Аналитическое решение задач нестационарной теплопроводности при переменных теплофизических характеристиках твердого тела связано с большими трудностями. Поэтому используются различные методы линеаризации, итерации и другие способы упрощения в решениях нелинейных уравнений нестационарной теплопроводности. Такие приближенные методы изложены в [7–12].

Одним из возможных способов расчета нелинейного переноса тепла, основанном на аппроксимации коэффициентов переноса, является метод итерации [7–10]. Сущность этого метода состоит в том, что при известном начальном распределении температуры в теле весь процесс сушки разбивается на большое число малых промежутков времени Δt . В дифференциальном уравнении теплопроводности производные по времени $\partial t/\partial \tau$ заменяются отношениями конечных приращений $\Delta t/\Delta \tau$ для каждого шага времени. Затем находят температуры в узловых точках k при переходах от одного интервала времени к следующему в момент времени τ , $\tau + \Delta t$ по значениям температур в узловых точках k с обеих сторон интервалов Δt ($k + 1$) и ($k - 1$). Такой метод позволяет учитывать непрерывное скачкообразное изменение температуры по выбранному шагу времени Δt [7–9]. Метод ступенчатой аппроксимации коэффициентов переноса ($\lambda_{\text{вл}}$, $c_{\text{вл}}$, $\bar{\alpha}$) с постоянными их значениями на расчетных промежутках времени Δt допустимо использовать в малоинтенсивных процессах сушки кож, когда теплофизические характеристики в процессе тепловой обработки изменяются незначительно при переходе от интервала к интервалу и можно при определении коэффициентов теплообмена $\bar{\alpha}$, теплопроводности $\lambda_{\text{вл}}$, удельной теплоемкости $c_{\text{вл}}$ применять ступенчатую аппроксимацию этих коэффициентов с постоянными их значениями на расчетных временных интервалах [5, 8, 9]. Таким образом, учитывается непрерывное изменение коэффициентов переноса от влагосодержания и температуры.

Коэффициент теплообмена $\bar{\alpha}$ определялся по формуле для теплообменного критерия Нуссельта [1, 2, 4, 13]:

$$\text{Nu} = C \text{Re}^{0,5} \left(\frac{T_c}{T_{\text{м.т}}} \right)^2 \left(\frac{\bar{u}}{\bar{u}_{\text{кр}}} \right)^n, \quad (10)$$

где число Нуссельта $\text{Nu} = \frac{\bar{\alpha} l}{\lambda_{\text{воз}}}$, $\bar{\alpha}$ – средние значения коэффициента теплоотдачи для поверхности влажного тела; $\text{Re} = \frac{v l}{\nu_{\text{воз}}}$ – число Рейнольдса; v – скорость воздуха; l – длина пластины по направлению потока воздуха; $\lambda_{\text{воз}}$, $\nu_{\text{воз}}$ – коэффициент теплопроводности и кинематическая вязкость воздуха, определяемые по таблицам [4] в зависимости от t_c .

Обработкой опытных данных по формуле (10) для конвективной сушки различных натуральных кож получены значения $C = 0,95$; $n = 0,65$ [13].

При определении температуры материала для второго периода тепловой обработки по формулам (8), (9) применялась кусочно-ступенчатая аппроксимация коэффициентов теплоотдачи с постоянными значениями этих коэффициентов на расчетных временных интервалах. Такой же подход применялся и для значений теплофизических характеристик материала $\lambda_{\text{вл}}$, $c_{\text{вл}}$ для тех же расчетных временных интервалов [7–9].

В табл. 1 представлены значения коэффициента теплопроводности для некоторых видов натуральных кож в зависимости от влагосодержания при температурах сушки $t_c \approx 30$ – 60 °C [1, 3].

Т а б л и ц а 1. Коэффициент теплопроводности $\lambda_{\text{вл}}$ (Вт/(м·°C)) для некоторых видов натуральных кож по данным [1, 3] в зависимости от влагосодержания

T a b l e 1. Coefficient of thermal conductivity $\lambda_{\text{вл}}$ (W/(m·°C)) for some types of natural leather according to [1, 3], depending on moisture content

Вид натуральной кожи	Влагосодержание кожи, \bar{u} , кг/кг					
	0,07	0,17	0,28	0,43	0,54	0,70
Юфть свиная хромового дубления	0,117	0,128	0,134	0,148	0,176	0,241
Опоек хромового дубления	0,058	0,064	0,068	0,085	0,166	0,198
Подошвенная кожа хромового дубления	0,132	0,144	0,156	0,176	0,195	0,232

В результате обработки экспериментальных данных, приведенных в [1, 3], получена зависимость для коэффициента теплопроводности $\lambda_{вл}$ для всех видов натуральных кож, которая аппроксимируется приближенным уравнением

$$\lambda_{вл} \approx \lambda_0 + 1,31 \cdot 10^{-3} \bar{t} \cdot \bar{u} \cdot [\exp(1,8 \cdot \bar{u})],$$

где λ_0 – теплопроводность сухой кожи (для рантовой подошвы $\lambda_0 = 0,121$ Вт/(м·°С), краснудубной юфти $\lambda_0 = 0,105$ Вт/(м·°С), опойка $\lambda_0 = 0,056$ Вт/(м·°С)). Удельная теплоемкость влажной кожи определяется по зависимости [2, 4]

$$c_{вл} = c_0 + c_{ж} \bar{u},$$

где c_0 – теплоемкость сухой кожи (для юфти хромового дубления $c_0 = 1800$ Дж/(кг·°С), опойка $c_0 = 1570$ Дж/(кг·°С)); $c_{ж}$ – теплоемкость жидкости, $c_{ж} = 4200$ Дж/(кг·°С).

Температура материала на поверхности пластины может быть определена из решения дифференциального уравнения нестационарной теплопроводности при граничных условиях третьего рода для частного случая, посредством предельного перехода при отсутствии в материале термического переноса вещества (критерий Поснова $Pn = 0$) и малых градиентах температуры по сечению тонкого тела и значения числа $Bi < 1$ [5]. Решение имеет вид [5, 8, 14]

$$\theta_{п} = \frac{t_c - t_{п}}{t_c - t_{м.т}} = \exp(-BiFo), \tag{11}$$

где $t_{п}$ – температура на поверхности материала; Fo – критерий Фурье; произведение $BiFo$ является функцией $m_t \tau_{п}$ [5, 12], m_t – темп нагрева влажного тела. Темп нагрева тела m_t определяется экспериментально путем измерения температуры в любой точке тела для двух последовательных моментов времени регулярного режима [5, 14]:

$$m_t = \frac{\ln \left(\frac{t_c - t_{п1}}{t_c - t_{п2}} \right)}{\tau_2 - \tau_1}. \tag{12}$$

В координатах $\ln(t_c - t_{п}) = f(\tau)$ температурная функция является прямой линией, следовательно, температура во втором периоде изменяется по экспоненте [5, 13]. Температура на поверхности пластины из формулы (11) имеет вид

$$t_{п} = t_c - (t_c - t_{м.т}) \exp(-m_t \tau_{п}), \tag{13}$$

где время $\tau_{п}$ находится по уравнению (3).

На рис. 1 и 2 изображены кривые сушки и температурные кривые $t_{п} = f(\tau)$, $t_{ц} = f(\tau)$, $t_{п} = f(\bar{u})$, $t_{ц} = f(\bar{u})$ в процессах сушки краснудубной юфти и опойка.

На графиках можно выделить три характерных участка: участок кратковременного прогрева материала, постоянной скорости сушки (первый период), падающей скорости (второй период). На стадии прогрева $\tau_{пр}$ подводимое к телу тепло расходуется на нагрев материала от начальной температуры до температуры мокрого термометра $t_{м.т}$, принимаемой приближенно равной температуре поверхности $t_{м.т} \approx t_{п}$, и на испарение влаги. Скорость сушки в этой стадии возрастает от нуля до скорости сушки в первом периоде N . Влагосодержание материала в первом периоде линейно уменьшается во времени ($|d\bar{u} / d\tau| = N = \text{const}$). По мере уменьшения влагосодержания скорость сушки падает и наступает период убывающей скорости сушки. Температура во втором периоде непрерывно возрастает, и при $\bar{u} < \bar{u}_{кр}$ начинается второй период сушки. При сушке тонких материалов при мягких режимах наблюдаются и период постоянной скорости сушки, и период постоянной температуры на уровне $t_{м.т}$.

Результаты расчетов температуры в центре и на поверхности пластин кожи по аналитическим формулам (8) и (13) приведены в табл. 2. Анализ экспериментальных кривых сушки и температурных кривых (см. рис. 1 и 2) для сушки юфти и опойка показал, что в среднем для второго периода сушки юфти ($\tau_{п} \approx 66$ мин) и опойка ($\tau_{п} \approx 40$ мин) при режимах сушки для юфти $t_c = 60$ °С и опойка $t_c = 45$ °С при сушке до влагосодержания $\bar{u} \approx 0,2$ с уменьшением влагосодержания на каждые $\Delta u = 0,1$ происходит изменение температуры на $\Delta t \approx 1,7\text{--}2,5$ °С для юфти, на $\Delta t \approx 1,5\text{--}1,8$ °С для опойка.

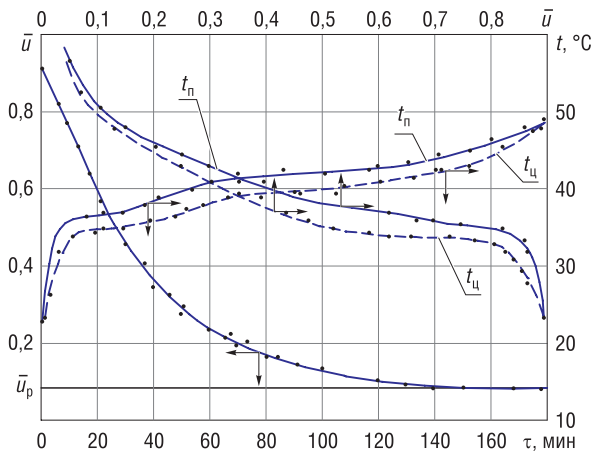


Рис. 1. Кривая сушки $\bar{u} = f(\tau)$ и температурные кривые для поверхности и в центре $t_n = f(\tau)$; $t_u = f(\tau)$ и $t_n = f(\bar{u})$; $t_u = f(\bar{u})$ для сушки красnodубной юфти при режиме сушки: $t_c = 60^\circ\text{C}$; $v = 1,5\text{ м/с}$; $\varphi = 35\%$

Fig. 1. Drying curve $\bar{u} = f(\tau)$ and temperature curves for surface and center $t_n = f(\tau)$; $t_u = f(\tau)$ and $t_n = f(\bar{u})$; $t_u = f(\bar{u})$ for drying the bark-tanned yuft during the drying mode: $t_c = 60^\circ\text{C}$; $v = 1.5\text{ m/s}$; $\varphi = 35\%$

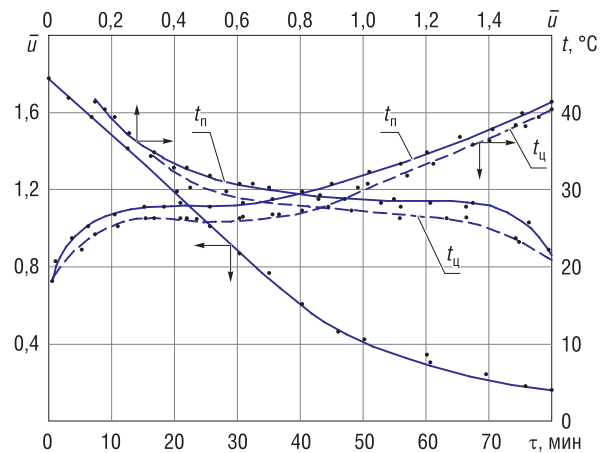


Рис. 2. Кривая сушки $\bar{u} = f(\tau)$ и температурные кривые для поверхности и в центре $t_n = f(\tau)$; $t_u = f(\tau)$ и $t_n = f(\bar{u})$; $t_u = f(\bar{u})$ для сушки хромового опойка при режиме сушки: $t_c = 45^\circ\text{C}$; $v = 1,0\text{ м/с}$; $\varphi = 27,5\%$

Fig. 2. Drying curve $\bar{u} = f(\tau)$ and temperature curves for surface and center $t_n = f(\tau)$; $t_u = f(\tau)$ and $t_n = f(\bar{u})$; $t_u = f(\bar{u})$ for drying box-calf during drying mode: $t_c = 45^\circ\text{C}$; $v = 1.0\text{ m/s}$; $\varphi = 27.5\%$

Т а б л и ц а 2. Результаты расчетов температуры в центре и на поверхности образцов кожи при сушке красnodубной юфти и опойка по аналитическим формулам (8) и (13)

Т а б л и ц а 2. The results of calculations of the temperature in the center and on the surface of the leather samples during the drying of the bark-tanned yuft and box-calf under the analytical formulas (8) and (13)

Юфть. Пластина $250 \times 120 \times 2$ мм. Режим сушки: $t_c = 60^\circ\text{C}$; $v = 1,5\text{ м/с}$; $\varphi = 35\%$; $\bar{u}_0 = 0,9$; $\bar{u}_{кр} = 0,63$; $u_p = 0,1$; $\rho_0 = 560\text{ кг/м}^3$; $c_0 = 1800\text{ Дж/(кг}\cdot^\circ\text{C)}$; $N = 2,68 \cdot 10^{-4}\text{ с}^{-1}$; $K = 3,48 \cdot 10^{-4}\text{ с}^{-1}$; $t_{м,т} = 35^\circ\text{C}$; $m_t = 1,83 \cdot 10^{-4}\text{ с}^{-1}$										
\bar{u}	$\bar{\alpha}, \text{Вт/(м}^2\cdot^\circ\text{C)}$	$\lambda, \text{Вт/(м}\cdot^\circ\text{C)}$	Bi	$Z \cdot 10^{-3}, \text{с}^{-1}$	$t_{ц}, ^\circ\text{C}$ (8)	$t_n, ^\circ\text{C}$ экс.	$t_n, ^\circ\text{C}$ (13)	$\tau_{п}, \text{с}$ экс.	$\tau_{п}, \text{с}$ (3)	
0,54	14,2	0,178	0,079	6,29	33,5	37,5	38	515	534	
0,43	11,8	0,147	0,077	6,00	35,2	39	40,5	1348	1360	
0,28	7,9	0,134	0,058	4,72	39,4	42,5	43	3100	3076	
0,20	5,8	0,126	0,045	4,15	43,6	45	46,5	3960	3880	
Хромовый опоек. Пластина $110 \times 100 \times 1,4$ мм. Режим сушки: $t_c = 45^\circ\text{C}$; $v = 1,0\text{ м/с}$; $\varphi = 27,5\%$; $\bar{u}_0 = 0,9$; $\bar{u}_{кр} = 0,63$; $u_p = 0,09$; $\rho_0 = 380\text{ кг/м}^3$; $c_0 = 1570\text{ Дж/(кг}\cdot^\circ\text{C)}$; $N = 5,4 \cdot 10^{-4}\text{ с}^{-1}$; $K = 5,96 \cdot 10^{-4}\text{ с}^{-1}$; $t_{м,т} = 28^\circ\text{C}$; $m_t = 3,33 \cdot 10^{-4}\text{ с}^{-1}$										
\bar{u}	$\bar{\alpha}, \text{Вт/(м}^2\cdot^\circ\text{C)}$	$\lambda, \text{Вт/(м}\cdot^\circ\text{C)}$	Bi	$Z \cdot 10^{-3}, \text{с}^{-1}$	$t_{ц}, ^\circ\text{C}$ (8)	$t_n, ^\circ\text{C}$ экс.	$t_n, ^\circ\text{C}$ (13)	$\tau_{п}, \text{с}$ экс.	$\tau_{п}, \text{с}$ (3)	
0,85	14,1	0,235	0,0417	14,80	26,3	28,5	29,2	300	302	
0,70	12,4	0,198	0,044	10,44	27,2	29,0	30,8	655	670	
0,50	9,5	0,163	0,039	9,75	29,3	31,5	32,7	1370	1350	
0,40	7,60	0,145	0,035	9,51	30,7	32,5	33,8	1780	1810	
0,20	4,55	0,132	0,028	7,22	35,6	37,0	37,6	2980	3120	

При этих условиях происходит изменение коэффициента теплопроводности $\lambda_{вд}$ в среднем на 5 % в каждом промежутке времени. Таким образом, общую погрешность при использовании метода кусочно-ступенчатой аппроксимации теплофизических характеристик можно принять при расчетах температуры по аналитическим формулам в 5 %.

Второй период сушки при сушке юфти при соблюдении погрешности в 5 % можно разделить на восемь промежутков времени по $\Delta t = 8$ мин, при сушке опойка – на семь промежутков с шагом по времени $\Delta t = 6$ мин. Разброс значений температуры, вычисленных по аналитическим уравнениям, от экспериментальных находится в области погрешности в 5 %.

Заключение. Использование аналитических решений дифференциальных уравнений нестационарной теплопроводности для расчета температуры кожи в периоде падающей скорости сушки с известными теплофизическими коэффициентами показало, что с допустимой погреш-

ностью для малоинтенсивных процессов можно использовать результаты аналитических решений. Анализ результатов расчетов по аналитическим формулам показал удовлетворительное совпадение значений расчетных температур с экспериментальными данными. Проведенное исследование подтверждает закономерности изменения температуры во втором периоде сушки, установленные экспериментальным путем. Совместно с экспериментальными методами аналитические имеют актуальные значения для практики сушки.

Список использованных источников

1. Кавказов, Ю. А. Тепло- и массообмен в технологии кожи и обуви / Ю. А. Кавказов. – М.: Легкая индустрия, 1973. – 272 с.
2. Лыков, А. В. Теория сушки / А. В. Лыков. – М.: Энергия, 1968. – 472 с.
3. Лыков, А. В. Кинетика и динамика процессов сушки и увлажнения / А. В. Лыков. – М.; Л.: Легкая промышленность, 1938. – 587 с.
4. Акулич, П. В. Расчеты сушильных и теплообменных установок / П. В. Акулич. – Минск: Беларус. навука, 2010. – 443 с.
5. Лыков, А. В. Теория тепло- и массопереноса / А. В. Лыков, Ю. А. Михайлов. – М.; Л.: Госэнергоиздат, 1963. – 536 с.
6. Лыков, А. В. Теория сушки капиллярно-пористых коллоидных материалов пищевой промышленности / А. В. Лыков, Л. Я. Ауэрман. – М.: Пищепромиздат, 1946. – 287 с.
7. Рудобашта, С. П. Массоперенос в системах с твердой фазой / С. П. Рудобашта. – М.: Химия, 1980. – 248 с.
8. Лыков, А. В. Теория теплопроводности / А. В. Лыков. – М.: Высшая школа, 1967. – 594 с.
9. Хрусталева, Б. М. Тепло- и массообмен: учеб. пособие / Б. М. Хрусталева, А. П. Несенчук; под общ. ред. А. П. Несенчука. – Минск: БНТУ, 2009. – Ч. 2. – 273 с.
10. Пехович, А. И. Расчеты теплового режима твердых тел / А. И. Пехович, В. М. Жидких. – Л.: Энергия, 1968. – 304 с.
11. Васильев, В. Н. Технология сушки. Основы тепло- и массопереноса: учеб. для вузов / В. Н. Васильев, В. Е. Куцакова, С. В. Фролов. – СПб.: ГИОРД, 2013. – 224 с.
12. Сажин, Б. С. Процессы сушки и промывки текстильных материалов / Б. С. Сажин, М. К. Кошелева. – М.: ФГБОУ ВПО «МГУДТ», 2013. – 301 с.
13. Ольшанский, А. И. Исследование кинетики конвективной сушки натуральных кож / А. И. Ольшанский, А. Л. Климентьев, В. В. Петренко // Вестн. Витеб. гос. технол. ун-та. – 2018. – № 1 (34). – С. 49–62.
14. Шорин, С. М. Теплопередача / С. М. Шорин. – М.: Высшая школа, 1964. – 491 с.

References

1. Kavkazov Y. A. *Heat and Mass Transfer in the Technology of Leather and Shoes*. Moscow, Legkaya industria Publ., 1973. 272 p. (in Russian).
2. Lykov A. V. *Theory of Drying*. Moscow, Energiya Publ., 1968. 472 p. (in Russian).
3. Lykov A. V. *Kinetics and Dynamics of Drying and Moistening Processes*. Moscow – Leningrad, Legkaya promishlennost' Publ., 1938. 587 p. (in Russian).
4. Akulich P. V. *Calculations of Drying and Heat Exchange Devices*. Minsk, Belaruskaya navuka Publ., 2010. 443 p. (in Russian).
5. Lykov A. V., Mikhailov Yu. A. *Theory of Heat and Mass Transfer*. Moscow – Leningrad, Gosenergoizdat Publ., 1963. 536 p. (in Russian).
6. Lykov A. V., Auerman L. Ya. *Theory of Drying Capillary-Porous Colloidal Materials of the Food Industry*. Moscow, Pishpromizdat Publ., 1946. 287 p. (in Russian).
7. Rudobashta S. P. *Heat Engineering*. Moscow, Koloss Publ., 2010. 599 p. (in Russian).
8. Lykov A. V. *Theory of Heat Conductivity*. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1967. 600 p. (in Russian).
9. Khrustaleva B. M., Nesenchuk A. P., Nesenchuk A. P., ed. *Heat and Mass Transfer. Part 2*. Minsk, BNTU Publ., 2009. 273 p. (in Russian).
10. Pekhovich A. I., Zhidkikh V. M. *Calculations of the Thermal Regime of Solids*. Leningrad, Energiya Publ., 1968. 304 p. (in Russian).
11. Vasiliev V. N., Kutsakova S. V., Frolov S. V. *Drying Technology. Basics of Heat and Mass Transfer*. St. Petersburg, GIORД Publ., 2013. 224 p. (in Russian).
12. Sazhin B. S., Kosheleva M. K. *Processes of Drying and Washing of Textile Materials*. Moscow, Moscow State University of Design and Technology, 2013. 301 p. (in Russian).
13. Olshansky A. I., Klimentev A. L., Petrenko V. V. Investigation of the kinetics of convective drying of natural leather. *Vestnik Vitebskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta = Vestnik of Vitebsk State Technological University*, 2018, no. 1 (34), pp. 49–62 (in Russian).
14. Shorin S. M. *Heat Transfer*. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1964. 491 p. (in Russian).

Информация об авторах

Ольшанский Анатолий Иосифович – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры технологии и оборудования машиностроительного производства, Витебский государственный технологический университет (Московский пр., 72, 210035, Витебск, Республика Беларусь). E-mail: tiomp@vstu.by

Гусаров Алексей Михайлович – кандидат технических наук, доцент кафедры технологии и оборудования машиностроительного производства, Витебский государственный технологический университет (Московский пр., 72, 210035, Витебск, Республика Беларусь). E-mail: gallvt@mail.ru

Жерносек Сергей Васильевич – кандидат технических наук, доцент кафедры технологии и оборудования машиностроительного производства, Витебский государственный технологический университет (Московский пр., 72, 210035, Витебск, Республика Беларусь). E-mail: zs_85@mail.ru

Information about the authors

Anatolii I. Ol'shanskii – Ph. D. (Engineering), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Technology and Equipment of Machine-Building Production, Vitebsk State Technological University (72, Moskovsky Ave., 210035, Vitebsk, Republic of Belarus). E-mail: tiomp@vstu.by

Aleksei M. Gusarov – Ph. D. (Engineering), Associate Professor of the Department of Technology and Equipment of Machine-Building Production, Vitebsk State Technological University (72, Moskovsky Ave., 210035, Vitebsk, Republic of Belarus). E-mail: gallvt@mail.ru

Sergei V. Zhernosek – Ph. D. (Engineering), Associate Professor of the Department of Technology and Equipment of Machine-Building Production, Vitebsk State Technological University (72, Moskovsky Ave., 210035, Vitebsk, Republic of Belarus). E-mail: zs_85@mail.ru