

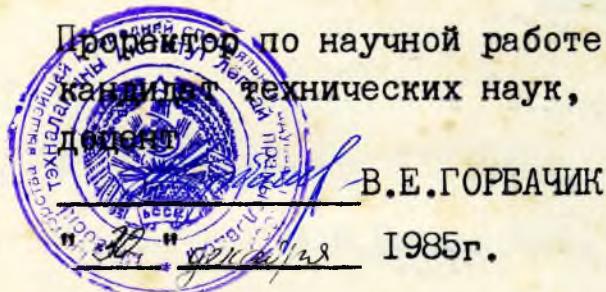
Министерство высшего и среднего специального образования БССР  
ВИТЕБСКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ ЛЕГКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ  
( ВТИЛП )

УДК 536.24 : 677/68

№ Гос.регистрации 76033400

0286.0 021628 •

УТВЕРЖДАЮ



О Т Ч Ъ Т  
о научно - исследовательской работе

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛО - МАССООБМЕНА В ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ УСТАНОВ -  
КАХ ТЕКСТИЛЬНОЙ И ЛЕГКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ ( заключительный )

ГБ - 42

Начальник научно-исследова-  
тельского сектора, инженер

И.Е.Правдивый

Зав. кафедрой, к.т.н., доцент

С.Г.Ковчур

Руководитель темы, к.т.н., доцент

Я.В.Шкляр

Витебск, 1986

Библиотека ВГТУ



Список исполнителей:

Руководитель темы, доцент,  
кандидат технических наук

Шкляр

Я.В.Шкляр (Введение ,  
разделы 2, 3,  
4, нормо -  
контролер)

25.12.1985г.

Доцент, кандидат технических  
наук

Ольшанский

А.И.Ольшанский( раздел 5 )

25.12.1985г.

Реферат

Отчёт I книга, 61 страница, 6 рисунков, 3 таблицы, 20 источников

КИНЕТИКА, СУШКА, ТЕПЛООБМЕН, МАССООБМЕН, ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ, ТЕПЛОВАЯ ЭНЕРГИЯ, ВТОРИЧНОЕ ТЕПЛО

Объектом исследования является процесс сушки капиллярно-пористых тел( в том числе текстильных и обувных материалов) в конвективных сушильных установках.

Цель работы - исследование кинетики процесса сушки, получение приближенных уравнений, позволяющих определять продолжительность этого процесса, температуру материала и производительность сушильных установок, разработка методов экономии тепловой энергии.

Проведено аналитическое исследование тепломассообмена в процессе конвективной сушки при граничных условиях третьего рода. Обработка экспериментальных данных позволила получить ряд уравнений для расчёта продолжительности процесса сушки и температуры материала в периоде убывающей скорости по скорости сушки в первом периоде. Получено уравнение для определения производительности сушильных установок по испаренной влаге и температуре материала с учетом кинетики процесса сушки.

Предложены схемы рационального использования вторичных энергоресурсов сушильных установок легкой промышленности.

## СОДЕРЖАНИЕ

	стр
1. ВВЕДЕНИЕ. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ	5
2. ПРИБЛИЖЕННЫЕ МЕТОДЫ РАСЧЕТА КИНЕТИКИ ПРОЦЕССА СУШКИ ВЛАЖНЫХ МАТЕРИАЛОВ	14
3. АНАЛИТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛО- МАССООБМЕНА В ПРОЦЕССЕ КОНВЕКТИВНОЙ СУШКИ ПРИ ГРАНИЧНЫХ УСЛОВИЯХ ТРЕТЬЕГО РОДА	25
4. ЗАВИСИМОСТЬ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ СУШИЛЬНЫХ УСТАНОВОК И ТЕМПЕРАТУРЫ МАТЕРИАЛА ОТ ОСНОВНЫХ КИНЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОЦЕССА СУШКИ	37
5. ВТОРИЧНЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ РЕСУРСЫ СУШИЛЬНЫХ УСТАНОВОК И ВОЗМОЖНЫЕ ПУТИ ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ	45
5.1. Анализ качественных показателей ВЭР сушильных установок	45
5.2. Утилизация тепла выкидного воздуха и конденсата греющего пара сушильных машин	47
5.3. Использование тепла уходящих газов котлоагрегатов для теплоснабжения сушильных установок ВЫВОДЫ	54 58
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	60

## I. ВВЕДЕНИЕ. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Для успешного претворения в жизнь решений XXVI съезда КПСС в области повышения благосостояния советского народа важное значение имеет дальнейшее развитие легкой промышленности.

Партия и Советское правительство ставят серьёзные задачи перед работниками легкой промышленности по увеличению производства добротных тканей, обуви, швейных и трикотажных изделий.

Технологические процессы в легкой и текстильной промышленности включают многие операции, связанные с тепло- и массообменом. При этом, как показывает опыт, эффективность значительной части протекающих технологических процессов определяется интенсивностью переноса теплоты и вещества. Здесь в первую очередь следует отметить такие операции отделки тканей, как крашение, отбелка и промывка, которые производятся в мокром состоянии. Материал после этих операций необходимо обезвоживать. Процесс обезвоживания осуществляется, как правило, в два этапа — механическое обезвоживание и сушка. Сушке подвергаются сырье (волокна), полуфабрикаты (пряжа) и готовая продукция — ткани.

Сушка представляет собой термический процесс удаления влаги из материала путем её испарения. Сушка, как технологической операции, принадлежит видное место в текстильном производстве, и от неё во многом зависят качество готовой продукции, производительность и технико-экономические показатели производства в целом.

Процесс сушки является теплофизическим и технологическим процессом, в котором изменяются структурно-механические, технологические и другие свойства материала. При этом сушка должна обеспечивать не только сохранение свойств высушиваемой ткани, но

в ряде случаев и улучшение её качества.

Главным направлением повышения эффективности и экономичности процесса сушки и производительности сушильных установок в целом является интенсификация процесса сушки, что нашло отражение, в частности, в использовании жёстких режимов и в изыскании методов, основанных на применении высоких температур, больших скоростей теплоносителя и больших лучистых потоков (с учетом свойств высушиваемого материала). Поэтому решение проблем, связанных с изучением кинетики процесса сушки, повышением производительности сушильных установок и улучшением их технико-экономических показателей, является весьма актуальным.

Физическая модель процесса конвективной сушки тонких текстильных материалов, когда в качестве теплоносителя служит нагретый воздух с постоянными параметрами, может быть представлена следующим образом: в начале процесса имеет место непродолжительная начальная стадия, когда убыль влагосодержания материала  $U$  происходит медленно, и за этот небольшой промежуток времени температура во всех точках материала увеличивается (предполагается, что начальная температура материала меньше температуры мокрого термометра  $T_m$ ).

После начальной стадии влагосодержание материала уменьшается с течением времени по линейному закону. На этом участке скорость сушки  $N$  будет величиной постоянной ( $\frac{du}{d\tau} = \text{const}$ ), температура материала  $T_{mat}$  не изменяется и равна температуре мокрого термометра. Этот период называется периодом постоянной скорости, первым периодом сушки или, по А.В.Лыкову [1], периодом постоянной температуры материала ( $T_{mat} = \text{const}$ ). Таким образом, в этом периоде  $\frac{dT_{mat}}{d\tau} = 0$ .

Начиная с некоторого значения влагосодержания  $U_{kp}$  температура поверхности материала  $T_p$  увеличивается с течением времени  $\tau$ , а скорость сушки уменьшается. Температура центра образца

материала  $T_y$  также увеличивается с течением времени, но температурная кривая  $T_y = f(\tau)$  немного отстает от кривой  $T_n = f(\tau)$ .

Таким образом, внутри материала возникает температурный градиент, который постоянно уменьшается и при достижении равновесного влагосодержания  $U_p$  становится равным нулю. При этом температура материала становится равной температуре воздуха  $T_c$ . Этот период сушки называется периодом падающей скорости, вторым периодом или, по А.В. Лыкову, периодом повышающейся температуры материала ( $T_{\text{МАТ}} = \text{const}$ ). Таким образом, в этом периоде  $\frac{dT_{\text{МАТ}}}{d\tau} > 0$ .

Важное значение для анализа процесса сушки имеет кривая скорости сушки, которая представляет собой зависимость изменения влагосодержания материала в единицу времени  $N = \frac{du}{d\tau}$  от величины этого влагосодержания. В начальной стадии скорость сушки быстро увеличивается, достигая постоянного значения. После этого следует первый период сушки, когда скорость  $N = \text{const}$ . Во втором периоде скорость сушки уменьшается и становится равной нулю при достижении равновесного влагосодержания.

Кривые скорости сушки могут служить только для качественного анализа процесса кинетики сушки, т.к. не обладают необходимой точностью.

Более надёжные результаты дают температурные кривые, которые представляют собой зависимость между температурой материала и его средним влагосодержанием.

В начале процесса сушки температура поверхности материала быстро повышается до значения, равного температуре мокрого термометра  $T_M$ . В первом периоде сушки эта температура остается постоянной ( $T_M = \text{const}$ ). Во втором периоде сушки температура материала повышается и при достижении равновесного влагосодержания становится равной температуре воздуха  $T_c$ .

Температурные кривые дают возможность оценить форму связи с материалом, а также имеют большое значение для технологии сушки, так как качество высушиваемого материала в значительной степени зависит от величины температуры материала и длительности её воздействия. Так, в первом периоде сушки температура материала равна  $T_M$ , поэтому в этом периоде можно применять достаточно высокие температуры воздуха. Совершенно очевидно, что чем больше влаги в материале, тем более он устойчив к воздействию высокой температуры. Следовательно, температурные кривые дают возможность организовать наиболее оптимальный режим сушки с учетом технологических свойств высушиваемого материала.

Кинетика процесса сушки определяется закономерностями взаимодействия материала с окружающей средой, т.е. условиями внешнего тепло- и массообмена.

В процессе конвективной сушки в результате воздействия материала с окружающим нагретым воздухом жидкость испаряется на поверхности материала и переходит в окружающую среду.

Испарение влаги с поверхности материала создает перепад влагосодержания между последующими слоями и поверхностным слоем, что вызывает диффузионный поток влаги. В процессе сушки происходит непрерывный подвод влаги из внутренних к поверхностным слоям материала, вследствие чего уменьшается влажность на поверхности и в глубине материала, причем скорость перемещения влаги внутри материала зависит от формы связи её с материалом.

Таким образом, интенсивность протекания процесса сушки определяется :механизмом перемещения влаги внутри материала, энергетикой испарения и механизмом перемещения влаги с поверхности материала в окружающую среду через пограничный слой.

Для первого периода процесса сушки интенсивность испарения с поверхности материала  $j_n$  и плотность теплового потока  $q$ , можно

определить соответственно по формулам Дальтона и Ньютона:

$$j_n = \alpha_p (P_{I\pi} - P_{Ic}) . \quad (I.1)$$

$$q_n = \alpha_\varphi (T_c - T_m) , \quad (I.2)$$

где:  $\alpha_p$  - коэффициент влагообмена;  $P_{I\pi}$ ,  $P_{Ic}$  - соответственно парциальные давления пара у поверхности материала и в окружающей среде;  $\alpha_\varphi$  - коэффициент конвективного теплообмена в периоде постоянной скорости сушки;  $T_c$ ,  $T_m$  - соответственно температуры окружающей среды и поверхности материала, равной температуре мокрого термометра.

Формулы Дальтона и Ньютона строго справедливы только для первого периода сушки, т.к. коэффициенты  $\alpha_p$  и  $\alpha_\varphi$  являются функцией времени и зависят от углубления поверхности испарения. Для периода постоянной скорости интенсивность сушки  $j_n$  и интенсивность теплообмена  $q_n$  определяется соответственно по заданному температурному напору  $\Delta T$  и перепаду парциального давления пара  $\Delta p$ . Поскольку в этом периоде температура материала неизменна, то всё тепло, переданное материалу, идёт на испарение влаги. В соответствии с законом сохранения энергии для первого периода сушки:

$$q_n = j_n \gamma , \quad (I.3)$$

где  $\gamma$  - удельная теплота парообразования.

Как известно, интенсивность сушки в первом периоде представляет собой количество влаги  $m_b^T$ , которое испаряется в единицу времени с единицы поверхности материала:

$$j_n = \frac{m_b^T}{F \gamma_I} .$$

Скорость сушки в первом периоде  $N$  представляет собой отношение массового количества влаги  $m_b^T$  в единицу времени к массе сухого тепла  $m_0$ :

$$N = \frac{m_b^T}{m_0 \gamma_I} .$$

Следовательно,

$$j_n = \frac{Nm_o}{F} = \frac{NV\rho_o}{F} = NR_v\rho_o , \quad (I.4)$$

где  $R_v = \frac{V}{F}$  – отношение объема материала и его поверхности (определяющий размер);  $\rho_o$  – плотность сухого скелета тела;  $T_c$  – время сушки в первом периоде .

Таким образом, уравнение (I.3) принимает вид:

$$q_n = \frac{\gamma m_o N}{F} = \gamma \rho_o R_v N. \quad (I.5)$$

По величине скорости сушки в первом периоде можно определить интенсивность теплообмена и наоборот.

Уравнение (I.3) можно представить в критериальном виде в соответствии с понятиями о критериях Кирпичёва, Коссовича и Лыкова.

Тепловой критерий Кирпичева для периода постоянной скорости сушки  $K_{iq} = \frac{q_n R_v}{\lambda T_c}$

представляет собой меру отношения интенсивности массообмена с поверхности тела к интенсивности массообмена в самом материале. Здесь  $a_m$  – коэффициент диффузии влаги;  $U_o$  – влагосодержание материала.

Критерий Коссовича  $K_o = \frac{\gamma \overline{U}_o}{C T_c}$

представляет собой зависимость между количеством теплоты, затраченным на испарение жидкости и на нагревание влажного тела.

Здесь  $L_u$  – удельная теплоемкость влажного тела.

Критерий Лыкова (критерий влаготеплопереноса)

$$L_u = \frac{a_m}{\alpha_g}$$

представляет собой отношение коэффициентов диффузии влаги  $a_m$  и диффузии тепла  $\alpha_g$  (коэффициента конвективного теплообмена).

Для периода постоянной скорости сушки основное уравнение (I.3) можно представить в критериальном виде:

$$K_{iq} = K_{im} L_u K_o. \quad (I.6)$$

Уравнения (I.5) и (I.6) являются основными соотношениями для периода постоянной скорости сушки.

В периоде падающей скорости интенсивность сушки и интенсивность теплообмена непрерывно уменьшаются с течением времени. При этом тепло  $Q(\tau)$ , подводимое к телу, расходуется на испарение влаги и на нагрев материала :

$$Q(\tau) = \gamma m_o \frac{d\bar{U}}{d\tau} + (c_o m_o + c_b m_b^{\frac{\pi}{2}}) \frac{dT_{MAT}}{d\tau}, \quad (I.7)$$

где  $\bar{U} = \frac{m_b^{\frac{\pi}{2}}}{m_o}$  — среднее влагосодержание;  $c_o$  и  $c_b$  — соответственно теплоемкости абсолютно сухого тела и влаги;  $m_o, m_b^{\frac{\pi}{2}}$  — соответственно массы сухого тела и влаги, которая испаряется во втором периоде;  $T_{MAT}$  — средняя температура материала.

Уравнение (I.7) можно представить в виде:

$$q(\tau) = \frac{Q_n(\tau)}{F} = \gamma \rho_o R_v \frac{d\bar{U}}{d\tau} + (c_o m_o + c_b m_b^{\frac{\pi}{2}}) \rho_o R_v \frac{dT_{MAT}}{d\tau}. \quad (I.8)$$

$$\text{Обозначим } c_o + c_b \bar{U} = C. \quad (I.9)$$

Величина  $C$ , как указывалось выше, является теплоёмкостью влажного тела.

Преобразуем уравнение (I.8) :

$$\begin{aligned} q(\tau) &= \rho_o R_v \left[ \gamma \frac{d\bar{U}}{d\tau} + C \frac{dT_{MAT}}{d\tau} \right] = \\ &= \gamma \rho_o R_v \frac{d\bar{U}}{d\tau} \left[ 1 + \frac{C}{\gamma} \frac{dT_{MAT}}{d\tau} \frac{d\bar{U}}{d\tau} \right] = \\ &= \gamma \rho_o R_v \frac{d\bar{U}}{d\tau} \left[ 1 + \frac{C}{\gamma} \frac{dT_{MAT}}{d\bar{U}} \right]. \end{aligned} \quad (I.10)$$

Величина

$$\frac{C}{\gamma} \cdot \frac{dT_{MAT}}{d\bar{U}} = R_b$$

представляет собой критерий Ребиндера, который является мерой отношения количества тепла, пошедшего на нагрев тела, к количеству тепла, идущего на испарение влаги.

Величина  $\frac{dT_{MAT}}{d\bar{u}}$  =  $\beta$  – температурный коэффициент сушки (основная характеристика кинетики процесса).

Следовательно, уравнение теплового баланса для периода падающей скорости сушки примет вид:

$$q(\tau) = \gamma \rho_o R_v \frac{d\bar{u}}{d\tau} (1 + R\beta) \quad (I.II)$$

или в критериальной форме:

$$K_{ig}(\tau) = K_{im_0}(\tau) K_o (1 + R\beta). \quad (I.I2)$$

А.В.Лыковым [1] было предложено приближённое уравнение кривой сушки с минимальным количеством констант. При этом кривая сушки аппроксимируется прямой, т.е. предполагается прямая пропорциональная зависимость между скоростью сушки и удаляемой влагой.

Уравнение приведенной кривой сушки имеет вид:

$$-\frac{du}{d\tau} = K (\bar{u} - u_p), \quad (I.I3)$$

где  $K = \frac{N}{W_{kp} - W_p} = \alpha N$  – коэффициент сушки, зависящий от режима процесса;  $W_{kp}$ ,  $W_p$  – соответственно критическая приведенная и равновесная влажности материала;  $\alpha$  – относительный коэффициент сушки, зависящий от свойств материала и его начальной влажности.

Для различных материалов и широкого диапазона изменения начальной влажности  $W_o$  относительный коэффициент сушки может быть определен по формуле :

$$\alpha = \frac{1.8}{W_o}. \quad (I.I4)$$

Таким образом, приведенное уравнение кривой сушки можно записать в виде:  $-\frac{du}{d\tau} = 1,8 N \frac{\bar{u} - u_p}{u_0}$ . (I.15)

Отношение скоростей сушки во втором и первом периодах

$$N^* = \frac{d\bar{u}}{d\tau N} . \quad (I.16)$$

Тогда на основании уравнений (I.5) и (I.II) отношение количеств теплоты, подводимых соответственно во втором и первом периодах, будет равно:

$$q^*(\tau) = \frac{q_n(\tau)}{q_n} = N^* (1 + R\ell) . \quad (I.17)$$

Уравнение (I.17) является основным уравнением кинетики сушки и устанавливает взаимосвязь между теплообменом  $[q_n^*(\tau)]$  и маскообменом ( $N^*$ ) при помощи критерия Ребиндера. Это уравнение справедливо для любого тела и любого метода сушки.

Применение на практике числа Ребиндера позволяет установить связь между интенсивностями тепло- и влагообмена и расчёту теплообмена свести к расчёту влагообмена.

Целью данной работы является исследование некоторых закономерностей взаимосвязанного тепломассообмена и кинетики процесса сушки влажных материалов, разработка приближенных методов расчёта этого процесса, изучение влияния отдельных факторов на производительность конвективных сушильных установок и температуру материала, а также анализ возможных методов экономии тепловой энергии в процессах сушки.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Лыков А.В. Теория сушки. М., Энергия, 1968.
2. Лыков А.В. Михайлов Ю.А. Теория тепло- и массопереноса. М., Госэнергоиздат, 1963.
3. Красников В.В. Кондуктивная сушка. М., Энергия, 1973.
4. Лыков А.В., Куц П.С., Ольшанский А.И. Кинетика теплобмена в процессах сушки влажных материалов. ИФЖ, т23, №3, 1972.
5. Куц П.С., Ольшанский А.И. Экспериментальное исследование зависимостей критерия Ребиндера от режимных параметров. Труды III конференции по сушке. Будапешт, 1971.
6. Куц П.С., Ольшанский А.И., Бром Е.Л. Зависимость температурного коэффициента сушки от критериев подобия тепло- массообмена при различных значениях теплообменного критерия Био. ИФЖ, том 33, №1, 1977.
7. Куц П.С., Ольшанский А.И. Зависимость между критерием подобия тепло- и массообмена и температурным коэффициентом сушки. ИФЖ, 23, №6, 1972.
8. Михайлов М.Д. Нестационарный тепло- и массоперенос в одномерных телах. ИТМО АН БССР. Минск, 1969.
9. Шкляр Я.В., Ольшанский А.И. Тепло- массообмен при сушке обуви в ко-конвективно-радиационных сушильных сушильных установках типа АРКС-0. Изв. ВУЗов. Технология легкой промышленности, №5, 1975.
10. Шкляр Я.В., Ольшанский А.И. Тепло-массообмен при сушке обуви в конвективно-радиационных сушильных установках типа АРКС-0. Изв. ВУЗов. Технология легкой промышленности, №2, 1977.
11. Гухман А.А. Применение теории подобия к исследованию процессов тепло-массообмена. М., Высшая школа, 1974.
12. Ольшанский А.И., Шкляр Я.В., Щербаков В.И. Определение производительности сушильных установок текстильной промышленности. Тезисы доклада конф-ции "Современные проблемы развития текстильной

промышленности и задачи подготовки инженерных кадров". М., МТИ, 1979.

13. Шкляр Я.В., Ольшанский А.И., Щербаков В.И. Расчёт производительности сушильных установок легкой промышленности. Изв. ВУЗов. Технология легкой промышленности, №5, 1980.
14. Шкляр Я.В., Щербаков В.И. Пути рационализации энергохозяйства предприятий МЛП СССР. Материалы конференции "Современные проблемы развития текстильной промышленности и задачи подготовки инженерных кадров", МТИ, Москва, 1981.
15. Шкляр Я.В., Ольшанский А.И., Казарновский В.Я. Состояние и перспективы использования ВЭР в текстильной промышленности, Тезисы докладов Республиканской научно-технической конференции "Комплексное использование ВЭР в промышленности БССР", Минск, 1981.
16. Шкляр Я.В., Щербаков В.И. Использование ВЭР в текстильной промышленности. Тезисы докладов Всесоюзной научной конференции "Основное направление по использованию ВЭР на предприятиях системы Минлегпрома СССР", Москва, 1982.
17. Шкляр Я.В., Ольшанский А.И., Казарновский В.Я. Рекомендации по рациональному использованию ВЭР трикотажной промышленности. Изв. ВУЗов. Технология легкой промышленности, №5, 1984.
18. Шкляр Я.В., Ольшанский А.И., Казарновский В.Я. Пути использования ВЭР на Витебской чулочно-трикотажной фабрике им. КИМ. Тезисы докладов Республиканской научно-технической конференции "Комплексное использование ВЭР в промышленности БССР", Минск, 1981.
19. Шкляр Я.В., Ольшанский А.И., Каазрновский В.Я. Пути экономии тепловой энергии и рационального использования ВЭР на Витебской чулочно-трикотажной фабрике им. КИМ. Промышленность Белоруссии, №7, 1983.
20. Шкляр Я.В., Щербаков В.И. Использование тепла уходящих газов котлоагрегатов для теплоснабжения сушильных установок легкой промышленности. Изв. ВУЗов. Технология легкой промышленности, №6, 1983.

