

МЕХАНИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ДРЕВЕСИНЫ
И ДРЕВЕСИНОВЕДЕНИЕ

УДК 674.04

НОВЫЕ ДАННЫЕ О ВЛИЯНИИ ИСПАРЕНИЯ
НА ТЕПЛООБМЕН ПРИ КОНВЕКТИВНОЙ СУШКЕ

(на примере древесины)

Г. С. ШУБИН, А. В. ЧЕМОДАНОВ

Московский лесотехнический институт

Известно, что при взаимодействии тела со средой их температура в принципе неодинакова. Изменение температуры и других параметров происходит в тонком поверхностном слое, называемом пограничным. При сушке одновременно возникают гидродинамический (скоростной), тепловой и диффузионный пограничные слои, толщины которых изменяются вдоль пластины, взаимосвязаны и зависят одна от другой; вследствие этого решение уравнения любого из пограничных слоев связано с решением всей системы уравнений.

Для практических целей сушки использовать уравнения пограничного слоя затруднительно. Поэтому экспериментальные данные по теплообмену, в том числе и при сушке, обрабатывают по правилам теории подобия.

Коэффициент теплообмена α при вынужденном движении газа получают из числа Нуссельта Nu на основании критериального уравнения

$$Nu = f(Re, Pr). \quad (1)$$

Здесь $Nu = \frac{\alpha}{\lambda} l$ (λ — коэффициент теплопроводности в пограничном слое; l — размер тела в направлении движения газа);

$Re = \frac{\omega l}{\nu}$ — критерий Рейнольдса (ω — скорость движения газа; ν — кинематическая вязкость газа в пограничном слое);

$Pr = \frac{\nu}{a}$ — число Прандтля (a — коэффициент теплопроводности в пограничном слое).

Для определенного газа (например, воздуха) число Прандтля постоянно, и зависимость (1) принимает вид:

$$Nu = c Re^n. \quad (2)$$

Результаты работ по теплообмену при сушке публиковались одним из авторов данной статьи [20—23], начиная с 1958 г. (в 1969 г. появилась работа В. А. Кныша по теплообмену при сушке шпона).

Практически все экспериментальные данные удовлетворительно описываются уравнением

$$Nu = 0,072 Re^{0,8}, \quad (3)$$

на основании которого построены графики зависимости $\alpha = f(\omega, t_c)$ [4].

В процессе сушки образуется поперечный поток массы, влияние которого на теплообмен оценивают в литературе по-разному. В соот-

ветствии с теорией [17, 19], испарение, как и вдув газа в пограничный слой, уменьшает коэффициент теплообмена. Опыты по пористому вдуву доказывают это положение [2, 4, 10, 14].

Ряд авторов [1, 3, 12, 13, 15, 16] отмечают, что коэффициент теплообмена возрастает по сравнению с «сухим» теплообменом. Эта ситуация хорошо известна специалистам и в разное время вызвала дискуссии, в которых высказывались различные предположения о влиянии массообмена на теплообмен.

Для учета этого влияния в уравнение (1) был введен [13] термодинамический параметр Гухмана Gu

$$Gu = \frac{t_c - t_m}{T_c}, \quad (4)$$

где t_c , T_c — температура среды;
 t_m — температура предела охлаждения.

А. В. Нестеренко [12] на основании обработки опытных данных ряда авторов по испарению воды и бензола получил уравнение

$$Nu = c Re^n Pr^{0,33} Gu^{0,175}, \quad (5)$$

в котором c и n имеют следующие значения: при $Re = 3,15 \cdot 10^3 \dots 2,2 \cdot 10^4$ $c = 0,51$, $n = 0,61$, а при $Re = 2,2 \cdot 10^4 \dots 3,15 \cdot 10^5$ — соответственно 0,027 и 0,9.

В работе [6] отмечено, что интенсивность испарения с поверхности жидкости и сушки с поверхности тела (желатин, глина, кожа, кирпич) в периоде постоянной скорости при одних и тех же условиях одинакова. Расчеты по выражению (5) дают более высокие значения Nu , чем при сухом теплообмене, и с повышением интенсивности испарения (со снижением критерия Gu) они возрастают.

Один из авторов настоящей статьи в опытах по сушке (древесина) получил (при введении чисел Pr и Gu соответственно в степенях 0,33 и 0,175, как это вытекает из работы [12]) критериальное уравнение [20]

$$Nu = 0,106 Re^{0,8} Pr^{0,33} Gu^{0,175}, \quad (6)$$

где диапазон изменения чисел $Re = 10\ 000 \dots 106\ 300$.

Экспериментальные точки, по которым получено это уравнение, укладываются в зону разброса точек уравнения (5) и получающиеся из (6) значения чисел Nu , естественно, также превышают значения Nu при сухом теплообмене. Нет оснований сомневаться в надежности данных экспериментов по теплообмену при испарении и сушке, приведенных нами и другими авторами. Причины расхождения при вдуве инертных газов в пограничный слой следует искать в чем-то ином.

Теплообмен при сушке капиллярно-пористого тела имеет специфику по сравнению с теплообменом как при вдуве в пограничный слой, так и с сухим и в меньшей мере — с теплообменом при испарении с открытой поверхности жидкости [5]. Выводы, вытекающие из сопоставления коэффициентов сухого теплообмена, исчисляемого по отношению к поверхности тела, и теплообмена при испарении и сушке, не вполне правомерны, хотя и нашли отражение в литературе. В случае принудительного поперечного потока пограничный слой, утолщаясь, уменьшает коэффициент теплообмена. При испарении (диффузионный процесс под влиянием разности концентрации) также образуется поперечный поток, который должен уменьшать α .

Действительно, как показано в работе [24], при одинаковом параметре вдува $f\omega$ испарение даже более эффективно в смысле теплосащиты по сравнению с принудительным потоком. В работах [1, 8, 9, 16]

показано, что при сушке капиллярно-пористого тела поверхность испарения может углубляться внутрь. В процессе теплообмена в этом случае участвует слой материала, дифференцированный учет воздействия которого следует рассматривать на базе решения сопряженной задачи. В зависимости от конкретных условий эффективный коэффициент теплообмена может уменьшаться и увеличиваться, так же как и истинная поверхность испарения по сравнению с геометрической.

В поисках объяснения влияния массообмена на теплообмен А. В. Лыков [7] выдвинул гипотезу о частичном выносе капелек жидкости с поверхности в пограничный слой, где также происходит испарение. Предполагаемая причина выноса состоит в механическом увлечении недостаточно прочно связанных с жидкостью некоторых капель после их конденсации, сопровождающей испарение. Объемное испарение представляет собой, следовательно, отрицательный источник тепла в пограничном слое. Критериальная форма записи учета объемного испарения приведена в работе В. И. Муштаева и др. [11].

Нам известна работа [25], выполненная в Швеции, где эффект выноса был зафиксирован при интенсивной сушке в перегретом паре.

Нами выполнены эксперименты на переносной установке с регулировкой нагрева паровоздушной среды и скорости ее движения. В установку вставляли сырой образец (пластина из древесины толщиной 3,0 мм), из которого испарялась влага. В процессе опыта фиксировали температуру поверхности образца и интенсивность испарения. Для визуализации выносимых в пограничный слой частиц поток над пластиной подсвечивали пучком лазерных лучей (работа выполнена нами на кафедре физики МЛТИ) с регистрацией на кино- и фотоаппаратуре.

Съемки зафиксировали вынос частиц жидкости в пограничный слой, что видно при просмотре киноплёнки. Это же видно и на фотографиях (см. рис. 1, б; $t_c = 80^\circ\text{C}$, $\omega = 2\text{ м/с}$, $\varphi = 0,4$, интенсивность испарения $q' = 0,012\text{ кг/м}^2 \cdot \text{с}$). При обдувании сухой пластинки в тех же условиях и одинаковых температурах поверхности образца выноса частиц обнаружено не было (рис. 1, а).

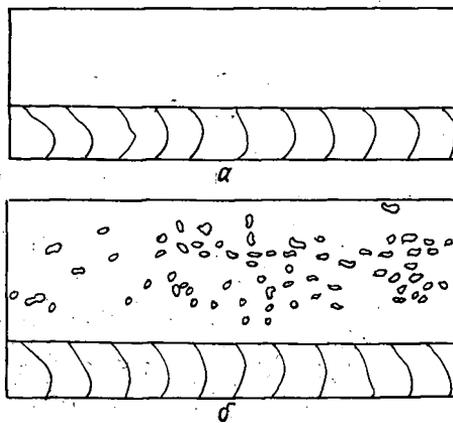


Рис. 1. Область над поверхностью сухой (а) и сырой (б) пластины в лучах лазера

Следовательно, гипотезу о выносе частиц жидкости в пограничный слой при испарении с поверхности капиллярно-пористого тела даже при умеренных интенсивностях можно считать доказанной.

При выносе частиц поверхность испарения увеличивается, теплообмен становится более мощным. Однако истинный коэффициент теплообмена, исчисляемый по эффекту только на поверхности, как отмечалось выше, при этом не увеличивается. Он может уменьшаться по

сравнению с коэффициентом теплообмена между средой и сухим телом или, учитывая небольшую интенсивность поперечного потока, оставаться примерно таким же.

Доказательство гипотезы о выносе частиц жидкости в пограничный слой изменяет ответ на вопрос о величине α и влиянии на него массоотдачи. Действительно, коэффициент α при испарении (сушке) определяется по интенсивности массообмена:

$$\alpha = \frac{q' r_{\phi}}{(t_c - t_{\Pi}) F_{\Pi}}, \quad (7)$$

в котором t_{Π} обычно равно t_m (r_{ϕ} — теплота испарения).

Очевидно, в случае выноса частиц жидкости в пограничный слой при подстановке в уравнение (7) величины q' (определяющей суммарный эффект испарения в нем и с поверхности тела) искусственно завышается коэффициент теплоотдачи, который при сухом теплообмене определяется по отношению к тепловому потоку на поверхности.

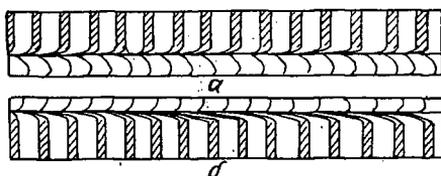


Рис. 2. Интерферограммы области над поверхностью сухой (а) и сырой (б) пластины

С целью проверки влияния испарения при сушке на тепловой пограничный слой, наряду с описанными экспериментами на лазерной установке, при тех же условиях опытов были получены интерферограммы в процессе испарения (сушки) и без испарения (рис. 2) на интерферометре Маха-Цендера фирмы ЛОМО, а также выполнены непосредственные замеры температуры в пограничном слое (рис. 3).

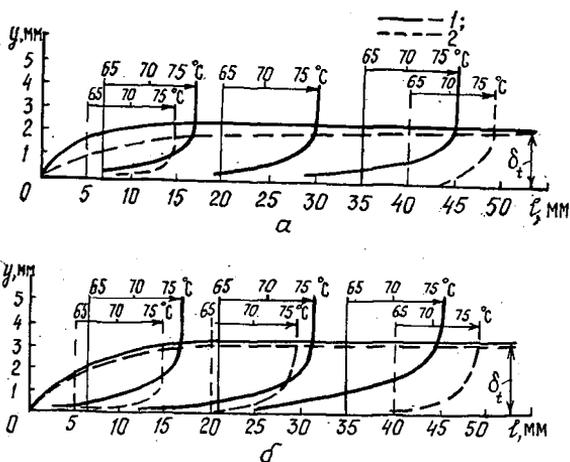


Рис. 3. Профили температуры в пограничном слое сухой (а) и сырой (б) пластины: 1 — по расширениям интерферограмм; 2 — замеры термопарой

Интерферометр настраивали на полосы конечной ширины (см. рис. 2). С целью более надежного получения профиля температур (так-

же наносившегося на рис. 3) по расшифрованным интерферограммам последние обрабатывали по двум схемам: 1) при фиксированном значении координаты по оси абсцисс; 2) по полосам интерферограмм.

Непосредственно температурные поля измеряли с помощью термомпар. Исследуемый поток двумерный, что позволило использовать термомпары со сваренными встык проводами, расположенными в изотермической плоскости. Термомпары перемещали при помощи координатника с микрометрическим винтом в направлении потока и стандартного индикатора положения в поперечном направлении.

Замеры показали, что толщина пограничного слоя при испарении практически не изменилась, в связи с чем коэффициент теплообмена в обоих случаях должен быть примерно одинаковым. В опытах имел место ламинарный пограничный слой (по величине числа Re). Использовали известное решение Э. Эккерта и Дж. Хартнетта (см. [5]). Расчет максимального параметра вдува по условиям опыта (он заведомо превышает расчет потока только с поверхности, который входит в решение задачи упомянутых авторов) дает величину

$$f_{\omega} = \frac{q'}{\rho\omega} \sqrt{Re} = \frac{0,012}{0,972 \cdot 2} 67,47 = 0,0 \quad (8)$$

Здесь число $Re = \frac{\omega l}{\nu} = \frac{2 \cdot 0,05}{22,1 \cdot 10^{-4}} = 4525$ (длина пластины в направлении набегающего потока $l = 0,05$ м); значения ν и плотности ρ взяты из работы [18].

При таком параметре вдува коэффициент теплообмена α уменьшается по сравнению с коэффициентом без вдува примерно на 5...6% [5]. Если бы в уравнение (8) была введена величина интенсивности испарения только с поверхности, это уменьшение было бы еще меньше или, вероятнее всего, совсем отсутствовало.

Возникает вопрос, можно ли использовать в расчетах данные по коэффициентам теплообмена, полученные в опытах при сушке материалов. Очевидно, эти коэффициенты, в соответствии с изложенным выше, являются не истинными, а эффективными, расчетными величинами, соответствующими условиям проведенных экспериментов. В аналогичных условиях, определяемых положениями теории подобия, их можно использовать для расчетов.

ЛИТЕРАТУРА

- [1]. Крылов Б. С., Захаров В. М. Тепло- и массообмен при испарении воды из пористой стенки // Изв. вузов. Энергетика.— 1971.— № 8.— С. 92—97. [2]. Кутателадзе С. С., Леонтьев А. И. Теплообмен и трение в турбулентном пограничном слое.— М.: Энергия, 1972.— 341 с. [3]. Лебедев П. Д. Сушка инфракрасными лучами.— М.: ГЭИ, 1953.— 253 с. [4]. Леонтьев А. И., Малышев Д. Д. Анализ процессов трения и теплообмена в бинарном пограничном слое на проницаемой поверхности // Вопросы теплопередачи: Докл. межвуз. семинара.— М., 1977.— С. 115—131.— (Сб. науч. тр. / МЛТИ.— Вып. 102). [5]. Лыков А. В. Тепло- и массообмен: Справочник.— 2-е изд., перераб. и доп.— М.: Энергия, 1973.— 463 с. [6]. Лыков А. В. Тепло- и массообмен в процессах сушки.— М.; Л.: Госэнергоиздат, 1956.— 464 с. [7]. Лыков А. В. Тепло- и массообмен в процессах испарения // Инж.-физ. журн.— 1962.— № 11.— С. 12—24. [8]. Лыков А. В., Васильева Г. В. Исследование тепло- и массообмена при испарении жидкости из капиллярно-пористого тела // Инж.-физ. журн.— 1968.— Т. 14, № 3.— С. 395—406. [9]. Михеева Н. С. Исследование механизма сушки влажных материалов // Сб. науч. тр. / МТИПП.— М., 1956.— Вып. 6.— С. 64—77. [10]. Мотулевич В. П. Турбулентный тепло- и массообмен на пластине при пористом отсосе и подаче различных газов // Инж.-физ. журн.— 1963.— Т. 6, № 1.— С. 127—132. [11]. Муштаев В. И., Логунов В. Ф., Тимонин А. С. К вопросу об объеме испарения. Критериальные зависимости для расчета конвективного тепло- и массообмена // Тепло- и массообмен— VII.— Минск: ИТМО АН БССР.— 1984.— Т. 6. [12]. Нестеренко А. В. Экспериментальное исследование тепло- и массообмена при испарении жидкости со свободной водной поверхности // ЖТФ.— 1954.— Т. 24, вып. 4.— С. 729—741. [13]. Полонская Ф. М.

Тепло- и массообмен в период постоянной скорости сушки // ЖТФ.— 1953.— Т. 23, вып. 5.— С. 802—805. [14]. Романенко П. Н., Харченко В. Н., Семенов Ю. П. Влияние на теплообмен и трение лодачи охладителей в турбулентный пограничный слой // Инж.-физ. журн.— 1965.— Т. 9, № 6.— С. 384—390. [15]. Сергеев Г. Т. Тепло- и массообмен при испарении жидкости в вынужденный поток газа // Инж.-физ. журн.— 1961.— № 2.— С. 77—81. [16]. Смольский Б. М. Внешний тепло- и массообмен в процессе конвективной сушки.— Минск: Белгосуниверситет, 1957.— 205 с. [17]. Теория тепло- и массообмена / Под ред. А. И. Леонтьева.— М.: Высш. школа, 1979.— 496 с. [18]. Теплотехнический справочник.— М.: Энергия, 1976.— Т. 2.— 896 с. [19]. Шляхтинг Г. Теория пограничного слоя / Пер. с нем. под ред. Л. Г. Лойцянского.— 5-е изд.— М.: Наука, 1969.— 742 с. [20]. Шубин Г. С. О теплообмене в процессе конвективной сушки // Науч. тр. / МЛТИ.— 1969.— Вып. 21.— С. 170—189. [21]. Шубин Г. С. Тепло- и массообмен в процессе высокотемпературной сушки шпона // Лесонженерное дело.— 1958.— № 2.— С. 132—137. [22]. Шубин Г. С. Физические основы и расчет процессов сушки древесины.— М.: Лесн. пром-сть, 1973.— 248 с. [23]. Шубин Г. С. Экспериментальное исследование тепло- и массообмена при высокотемпературной конвективной сушке плоских древесных материалов // Тепло- и массоперенос.— М., 1963.— Т. 4.— С. 186—196. (Материалы I Всесоюз. совещ. по тепло- и массообмену.— Минск, 1961), [24]. Шульман З. П. Исследование конвективного тепломассообмена на поверхности тела произвольной конфигурации при испарительном пористом охлаждении: Автореф. дис. ... канд. техн. наук.— Минск, 1962.— 24 с. [25]. Malmquist L., Meishner H. Über den Wärmeübergang bei der Konvektion von Holz in Heissdampf // Holz als Roh- und Werkstoff.— 1964.— Bd. 22.— S. 96—106.

Поступила 12 мая 1989 г.

УДК 630*812 : 630*845.54

ГИГРОСКОПИЧНОСТЬ ТЕРМООБРАБОТАННОЙ ДРЕВЕСИНЫ

К. Ф. ДЯКОНОВ, Т. К. КУРЬЯНОВА, В. А. ШЕКИН

Воронежский лесотехнический институт

Термообработка древесины изменяет ее гигроскопичность, что достаточно полно рассмотрено в ряде трудов [5—7] и хорошо просматривается на графике изменения устойчивой влажности древесины сосны, обработанной при различных температурах в течение 96 ч (см. рис.). Однако оставалось некоторое сомнение в устойчивости приобретенного свойства, так как древесина предназначена для работы в изделиях в течение длительного времени.

Для изучения вопроса группа образцов термообработанной древесины в 1963—1964 гг. была заложена на длительное хранение [2—4].

Нами приведены результаты по определению гигроскопичности древесины сосны и березы спустя 25 лет после ее термической обработки.

Методические условия

1. Определение устойчивой влажности. Образцы древесины размером $20 \times 20 \times 30$ мм выдерживали в комнатных условиях ($t = 20 \pm 2$ °С, $\varphi = 50 \pm 10$ %) и периодически взвешивали. Число образцов на каждый вид испытания — 10 шт.
2. Определение предела устойчивой влажности. После выдержки в комнатных условиях образцы помещали в эксикаторы с концентрированной серной кислотой и выдерживали там 100 дн. Влажность древесины при этом достигала наименьшего значения и была близкой к сухому состоянию. Затем образцы помещали в эксикаторы, но уже над раствором серной кислоты со степенью насыщенности водяных паров, близкой к 100 %, и выдерживали 90 дн, периодически взвешивая. Данные по предельной устойчивой влажности древесины сведены в табл. 1. Результаты экспериментов обрабатывали методами математической статистики, показатель точности не превышал 3 %.

Хотя предельная устойчивая влажность древесины по физическому смыслу близка к пределу гигроскопичности, однако так ее назвать нельзя, так как условия проведения наших опытов не полностью соответствовали условиям установления предела гигроскопичности образцов древесины.