



УДК: 66.047

МАССОПРОВОДНОСТЬ ПРИ СУШКЕ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

С.П. Рудобашта

Станислав Павлович Рудобашта

Кафедра теплотехники, гидравлики и энергообеспечения предприятий, Российский государственный аграрный университет – МСХА им. К.А. Тимирязева, ул. Тимирязевская, 49, Москва, Российская Федерация, 127550

E-mail: rudobashta@mail.ru



Рассмотрены классы непористых, капиллярно-пористых и коллоидных капиллярно-пористых материалов, как объектов сушки, применяемых в строительстве. Проанализированы особенности внутреннего массопереноса в них. Отмечено, что основным коэффициентом внутреннего массопереноса является коэффициент массопроводности (коэффициент диффузии влаги). Отмечено, что при сушке он существенно зависит не только от температуры, но и от влагосодержания материала. Расчет кинетики сушки материалов с использованием этого коэффициента требует учета этих зависимостей. Отсутствие данных по коэффициенту массопроводности затрудняет применение математических методов расчета кинетики сушки на основе решений дифференциальных уравнений массо- и теплопроводности. Указано, что разработка зонального метода определения концентрационной зависимости этого коэффициента существенно облегчило накопление данных по нему. Приведены примеры экспериментальных данных по коэффициенту массопроводности при сушке материалов разных классов. Обсуждены вопросы кинетического расчета процесса сушки материалов на основе теоретических математических моделей – аналитических и численных, предполагающих использование данных по теплофизическим характеристикам материалов. Указано, что математические методы в настоящее время вышли на первый план в связи с общим развитием теории сушки, накоплением данных по коэффициенту массопроводности, повсеместным распространением персональных компьютеров и развитием эффективных вычислительных комплексов. Для расчета кинетики сушки материалов, имеющих правильную геометрическую форму, рекомендован зональный метод, основанный на решениях линейных дифференциальных уравнений массо- и теплопроводности, применимых в узких диапазонах изменения влагосодержания материала – как простой в применении и обеспечивающий достаточную для инженерных целей точность.

Ключевые слова: сушка, классы высушиваемых материалов, массопроводность, кинетический расчет

Для цитирования:

Рудобашта С.П. Массопроводность при сушке строительных материалов. Умные композиты в строительстве. 2021. Т. 2. №. 2. С. 16-22 URL: http://comincon.ru/index.php/tor/issue/view/V2N2_2021

DOI: 10.52957/27821919_2021_2_16



UDC: 66.047

MASS CONDUCTIVITY DURING DRYING OF BUILDING MATERIALS

S.P. Rudobashta

Stanislav P. Rudobashta

*Department of Heat Engineering, Hydraulics and Power Supply of Enterprises, Russian State Agrarian University –
Timiryazev Moscow Agricultural Academy, 49 Timiryazevskaya st., Moscow, Russia, 127550*

E-mail: rudobashta@mail.ru



The paper considers classes of nonporous, capillary-porous and colloidal capillary-porous materials as drying objects used in construction. The specific aspects of internal mass transfer in them are analyzed. It is noted that the main coefficient of internal mass transfer is the coefficient of mass conductivity (moisture diffusion coefficient). It is noted that during drying, it significantly depends not only on the temperature, but also on the moisture content of the material. The drying dynamics of materials using this coefficient should be calculated by taking into account these dependencies. The lack of data on the mass conductivity coefficient makes it difficult to apply mathematical methods for calculating the drying kinetics based on solutions of the differential equations of mass and heat conductivity. It is indicated that the development of a zonal method for determining the concentration dependence of this coefficient significantly facilitated the accumulation of data on it. The paper gives examples of experimental data on the mass conductivity coefficient for drying materials of different classes. It also discusses the issues of kinetic calculation of the drying process of materials on the basis of theoretical mathematical models-analytical and numerical, involving the use of data on the thermophysical characteristics of materials. It is indicated that mathematical methods have now come to the fore in connection with the general development of the drying theory, the accumulation of data on the mass conductivity coefficient, the ubiquity of personal computers and the development of efficient computing systems. To calculate the drying kinetics of materials with the correct geometric shape, the zonal method is recommended, based on solutions of linear differential equations of mass and heat conductivity, applicable in narrow ranges of changes in the moisture content of the material-as easy to use and providing sufficient accuracy for engineering purposes.

Key words: *drying, classes of dried materials, mass conductivity, kinetic calculation*

For citation:

Rudobashta S.P. Mass conductivity during drying of building materials. Smart Composite in Construction. 2021. Vol. 2. No 2. P. 16-22 URL: http://comincon.ru/index.php/tor/issue/view/V2N2_2021

DOI: 10.52957/27821919_2021_2_16



ВВЕДЕНИЕ

Сушка широко применяется в различных технологиях, в том числе в строительстве, где сушке подвергаются изделия из бетона, гипса, древесины, полимеров – как при их получении, так и на стадии эксплуатации.

В соответствии с современными представлениями все высушиваемые материалы подразделяются на три класса: 1) непористые (большинство полимеров, высушиваемых от внутренней влаги), 2) капиллярно-пористые – материалы с капиллярными порами, стенки которых не проницаемы для влаги, и 3) коллоидные капиллярно-пористые материалы – материалы с капиллярными порами, стенки которых проницаемы для влаги [1]. В непористых материалах (полимерах) молекулы воды разобцены (вода растворена в полимере по механизму абсорбции) и ее перенос происходит путем активированной молекулярной диффузии молекул воды через матрицу полимера. В капиллярно-пористых материалах перенос влаги происходит в порах материала в жидкой и паровой фазах под действием ряда механизмов. Строительные материалы неорганической природы, такие как изделия из бетона и двухводного гипса, являются типичными представителями капиллярно-пористых материалов. Кристаллоидратная влага, содержащаяся в бетоне и двухводном гипсе, в процессе сушки не удаляется. К коллоидным капиллярно-пористым материалам относятся все материалы растительного и животного происхождения (они имеют клеточную структуру и содержат иммобилизованную клетками влагу), а также многие пищевые материалы (например, макароны). К строительным коллоидным капиллярно-пористым материалам относится древесина.

Класс материала и формы связи влаги с материалом накладывают свой отпечаток на внутренний массоперенос, который проявляется в величине коэффициента массопроводности и его температурной и концентрационной зависимостях.

Цель данной работы – проанализировать коэффициент массопроводности при сушке строительных материалов разного класса на основе экспериментальных работ, выполненных, в основном автором с сотрудниками, а также проанализировать кинетический расчет процесса сушки с его применением.

КОЭФФИЦИЕНТ МАССОПРОВОДНОСТИ ПРИ СУШКЕ НЕПОРИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ (ПОЛИМЕРОВ)

В современном строительстве широко применяют изделия из различных полимеров, которые часто производят из расплава полимерного гранулята на литневых и шприцевых машинах. При этом полимерный гранулят перед переработкой в изделия должен быть тщательно высушен до низких значений остаточного влагосодержания (порядка 10^{-4} кг/(кг сух. м-ла) – во избежание появления брака в изделиях в виде пузырей, вздутий и т.д. Как показали исследования, гранулы полимеров представляют собой непористые материалы, глубокая сушка которых характеризуется рядом особенностей [1,3]: 1) процесс полностью контролируется внутренней диффузией, 2) вследствие намного большей инерционности поля влагосодержаний по сравнению с полем

температур (число $Lu = D/a \ll 1$) гранулы полимера очень быстро прогреваются до температуры контактирующего с ним сушильного агента, поэтому в окрестности высушиваемой гранулы ее температура и контактирующего с ней сушильного агента практически одинаковы (балансовая задача по теплоте, 3) конечное влагосодержание материала соизмеримо с равновесным влагосодержанием, поэтому требуется его точное задание для обеспечения требуемой точности кинетического расчета, 4) гранулы полимеров имеют достаточно правильную геометрическую форму (сфера, ограниченный цилиндр, прямоугольный параллелепипед), что делает целесообразным применение для кинетического расчета аппарата дифференциального уравнения массопроводности.

В связи с этим были проведены систематические исследования коэффициента массопроводности (коэффициента диффузии влаги) практически для всех промышленно выпускаемых гранулированных полимеров, результаты которых отражены в [1, 3-8]. Большинство из этих исследований проводилось на специально созданной для этих целей установке, описанной в [9]. Для определения концентрационной зависимости коэффициента массопроводности (в данном случае эффективного коэффициента молекулярной диффузии) был использован зональный метод, который впервые был опубликован в [10], а затем использовался во многих работах [1, 4-9].

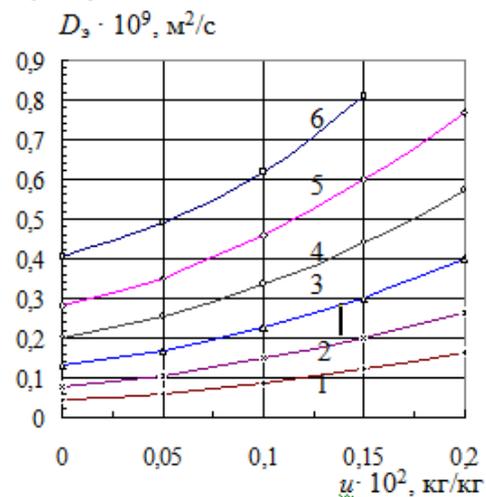


Рис. 1. Зависимости $D_e = f(u)$ при сушке полипропилена [5]: 1 – 50 °C; 2 – 70 °C; 3 – 90 °C; 4 – 110 °C; 5 – 130 °C; 6 – 150 °C

Fig. 1. Dependences of $D_e = f(u)$ when drying polypropylene [5]: 1 – 50 °C; 2 – 70 °C; 3 – 90 °C; 4 – 110 °C; 5 – 130 °C; 6 – 150 °C

Как показали эти исследования, эффективный коэффициент молекулярной диффузии влаги в полимере D_e при сушке существенно зависит от влагосодержания материала, которую необходимо учитывать при расчете кинетики сушки. На рис. 1 в качестве примера показаны концентрационные зависимости коэффициента молекулярной диффузии при сушке полиэтилена, зависимости $D_e = f(u)$ для остальных полимеров аналогичны.

Температурная зависимость коэффициента диффузии D_e хорошо описывается уравнением Аррениуса, это



показывает, что миграция молекул воды в полимерах происходит по механизму активированной молекулярной диффузии.

КОЭФФИЦИЕНТ МАССОПРОВОДНОСТИ ПРИ СУШКЕ КАПИЛЛЯРНО-ПОРИСТЫХ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Типичным представителем капиллярно-пористых строительных материалов является двухводный гипс ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), который образуется при затворении водой полуводного гипса ($\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$) в процессе изготовления изделия из него (см., например, [11]). Поры материала в гипсовом камне заполнены водой, которая удаляется путем ее испарения в последующем процессе сушки. Отливки из гипса используются в качестве строительного материала, а также при декоративном оформлении зданий и сооружений. В [12] исследовали массопроводность при сушке образцов из двухводного гипса – путем экспериментального определения в различные моменты времени распределения влагосодержания по длине гипсового стержня, влагоизолированного с боковой поверхности и высушиваемого с торцов. Из полученных кривых распределения влагосодержания $u = f(x)$ по уравнению массопроводности

$$i = -k\rho_0 \frac{\partial u}{\partial x}, \quad (1)$$

где i – плотность потока влаги через образец, $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$; k – коэффициент массопроводности, $\text{м}^2/\text{с}$; ρ_0 – плотность абсолютно сухого материала, $\text{кг}/\text{м}^3$; x – координата, направленная вдоль оси стержня, м определяли концентрационную зависимость коэффициента массопроводности $k = f(u)$. При этом из-за интенсивного притока теплоты через влагоизолированную боковую поверхность образца он интенсивно прогревался, и его температура практически была равна температуре сушильного агента (изотермические условия сушки).

Было показано, что уравнение массопроводности выполняется. В результате проведения исследований при различных температурах были получены температурно-концентрационные зависимости коэффициента массопроводности, имеющие следующий вид:

- для влагосодержания материала ниже $0,068 \text{ кг}/(\text{кг сух. м-ла})$

$$k = \frac{3,3 \cdot 10^{-9} (T/T_0)^{10,6} \varepsilon^{0,9}}{1 - 11,7u}, \quad (2)$$

- для влагосодержания материала выше $0,068 \text{ кг}/(\text{кг сух. м-ла})$

$$k = 3,3 \cdot 10^{-5} u^{2,72} (T/T_0)^{6,3} \varepsilon^{0,9}, \quad (3)$$

где T – температура в К; $T_0 = 273 \text{ К}$; ε – пористость материала, $\text{м}^3/\text{м}^3$.

При сушке капиллярно-пористых материалов внутренний массоперенос осуществляется как в жидкой, так и паровой фазе в результате действия ряда механизмов массопереноса, причем вклад каждого из них в ходе сушки непрерывно меняется [1, 2]. Е. Wicke и R. Kallenbach выделили (1941 г.) следующие четыре вида изотермического массопереноса в

порах: свободную диффузию в газовой фазе, кнудсеновскую (или стесненную) диффузию, поверхностную диффузию и твердотельную диффузию. Последняя происходит тогда, когда диаметр поры настолько мал, что потенциальные поля противоположных стенок пор перекрываются. Позднее [2, 13] было показано, что в порах материала при сушке имеет место капиллярная массопроводность (тонкие поры высасывают влагу из более широких капилляров и транспортируют ее к поверхности). Н.В. Чураев далее в целом ряде работ показал (см., например, [14]), что влага в порах высушиваемого материала перемещается также под действием градиента расклинивающего давления пленки жидкости. Сложное сочетание различных видов массопереноса обуславливает величину и концентрационную зависимость коэффициента массопроводности при сушке капиллярно-пористого материала.

При сушке, рассматривая совместный перенос влаги в паровой и жидкой фазах в порах материала, их сводят (с использованием изотермы фазового концентрационного равновесия) к единой движущей силе – градиенту влагосодержания ($grad u$), в результате чего паросоставляющая коэффициент массопроводности $k_{\text{пар}}$ становится зависящей также от производной $\frac{\partial C_{\text{п}}}{\partial u}$: $k_{\text{пар}} = D_{\text{пар}} \frac{\partial C_{\text{п}}}{\partial u}$, где $D_{\text{пар}}$ – коэффициент диффузии пара; $C_{\text{п}}$ – концентрация пара в порах материала. Согласно О. Кришеру [13] в области больших влагосодержаний основным механизмом массопереноса в капиллярно-пористых материалах является капиллярная массопроводность, а в области низких – диффузия пара. Коэффициент диффузии водяного пара $D_{\text{пар}}$ пропорционален $T^{1,81}$ [13], значительно более высокой степени в своей температурной зависимости коэффициент массопроводности в уравнении (2) обязан производной $\frac{\partial C_{\text{п}}}{\partial u}$.

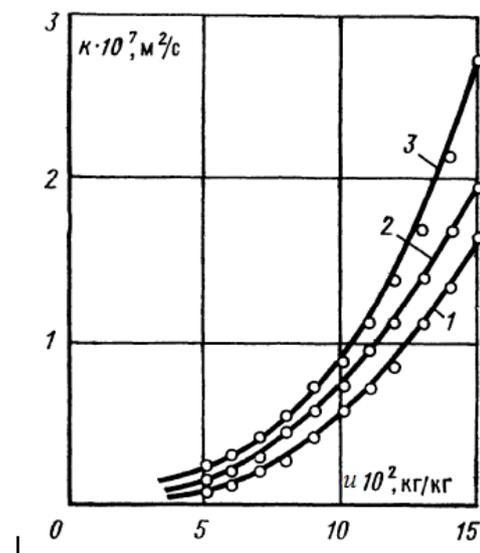


Рис. 2. Влияние пористости на массопроводность при сушке двухводного гипса ($t = 50 \text{ }^\circ\text{C}$):

1 - $\varepsilon = 0,39 \text{ м}^3/\text{м}^3$; 2 - $0,46 \text{ м}^3/\text{м}^3$; 3 - $0,50 \text{ м}^3/\text{м}^3$

Fig. 2. Effect of porosity on mass conductivity during drying of two-water gypsum ($t = 50 \text{ }^\circ\text{C}$):

1 - $\varepsilon = 0,39 \text{ m}^3/\text{m}^3$; 2 - $0,46 \text{ m}^3/\text{m}^3$; 3 - $0,50 \text{ m}^3/\text{m}^3$



На рис. 2 показано влияние пористости на коэффициент массопроводности при сушке образцов двуводного гипса. Пористость материала изменяли за счет изменения удельного количества воды при затворении полуводного гипса. Как видно из рисунка, с увеличением пористости коэффициент массопроводности возрастает. Одновременно рис. 2 иллюстрирует общий характер зависимостей $k = f(u)$, для данного капиллярно-пористого материала, которые представляют собой вогнутые монотонно возрастающие линии.

Большое влияние на коэффициент массопроводности при сушке капиллярно-пористого материала оказывает также размер пор. Учитывая разный механизм переноса газообразного вещества в порах, капиллярные поры в теории сушки делят: 1) на микрокапилляры (радиус пор $\tilde{r} < 10^{-7}$ м) и 2) макрокапилляры (радиус пор $\tilde{r} > 10^{-7}$ м) [1, 2]. Соответственно, материалы с радиусом пор $\tilde{r} < 10^{-7}$ м называют микрокапиллярно-пористыми, с радиусом пор $\tilde{r} > 10^{-7}$ м – макрокапиллярно-пористыми и с радиусом пор $\tilde{r} > 10^{-5}$ м – грубопористыми. Измерения, выполненные методом ртутной порометрии, показали, что в обсуждаемых образцах двуводного гипса пористостью $0,392 \text{ м}^3/\text{м}^3$ определяющий радиус пор был равен $\tilde{r} = 0,49$ мм. В таких капиллярах основная доля влаги перемещается в виде жидкости. Из сравнения рис. 1 и 2 видно, что коэффициент массопроводности при сушке капиллярно-пористых материалов с макрокапиллярами на два порядка больше, чем при сушке непористых материалов.

Приведенный анализ показывает, что из-за совместного действия различных механизмов массопереноса коэффициент массопроводности при сушке капиллярно-пористого материала сложным образом зависит от температуры и влагосодержания материала. Для обеспечения достаточной точности кинетического расчета процесса сушки на основе решения дифференциального уравнения массопроводности необходимо учитывать температурную и концентрационную зависимости коэффициента массопроводности – на основе экспериментальных данных.

КОЭФФИЦИЕНТ МАССОПРОВОДНОСТИ ПРИ СУШКЕ КОЛЛОИДНЫХ КАПИЛЛЯРНО-ПОРИСТЫХ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

К числу высушиваемых коллоидных капиллярно-пористых строительных материалов относится древесина – в форме досок, брусьев, различных фасонных деталей. Тела из древесины имеют обычно правильную геометрическую форму, что позволяет рассчитывать кинетику их сушки на основе решений дифференциальных уравнений тепло- и массопроводности. Основным коэффициентом, отвечающим за внутренний массоперенос, является коэффициент массопроводности (диффузии влаги). Его определение было начато в 20-х годах XX века. Укажем последовательно основные наиболее ранние работы, посвященные его определению: Stillwell (1926 г.), Martley (1926 г.), А.В. Лыков (1933 г.), Ludwig (1933 г.), К. Egner (1933 г.), Н. Schauss (1940 г.). Наиболее полные данные по массопроводности древесины получены П.С. Серговским (1953 г.) [15]. Древесина характеризуется анизотропией свойств: в ней массопроводность в осевом направлении на порядок выше, чем в радиальном и тангенциальном, что показал еще К. Egner. При сушке коллоидных

капиллярно-пористых материалов, в отличие от капиллярно-пористых, добавляется осмотический перенос влаги, который накладывает свой отпечаток на концентрационную зависимость коэффициента массопроводности.

На рис. 3 показана зависимость $k = f(u)$ [2] для древесины. Как видно, коэффициент массопроводности при сушке древесины имеет тот же порядок, что и при сушке непористых полимеров. Согласно А.В. Лыкову [2], сложный характер зависимости коэффициента массопроводности (коэффициента диффузии влаги) коллоидных капиллярно-пористых материалов типа древесины от влагосодержания объясняется изменением с влагосодержанием доминирующего механизма внутреннего массопереноса в процессе сушки. В области малых влагосодержаний – до точки максимума на кривых $k = f(u)$ у коллоидных капиллярно-пористых материалов типа древесины доминирующим массопереносом по А.В. Лыкову является осмотический перенос влаги, а при больших влагосодержаниях (на ниспадающей правой ветви зависимости $k = f(u)$ после точки максимума) – диффузия пара. При весьма больших влагосодержаниях материала имеет место капиллярная массопроводность. Этот участок зависимости $k = f(u)$ наблюдается у древесины при $u > 1$ (см. рис. 3).

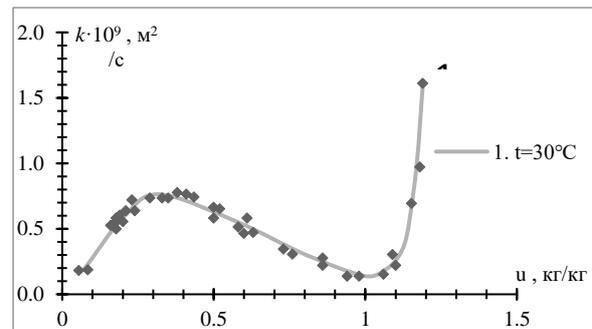


Рис. 3. Зависимость $k = f(u)$ для древесины (сосна) при $t = 30$ °C [2]

Fig. 3. Dependence of $k = f(u)$ for wood (pine) at $t = 30$ °C [2]

ОПИСАНИЕ ВНУТРЕННЕГО ВЗАИМОСВЯЗАННОГО ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА ПРИ СУШКЕ

Внутренний тепломассоперенос при сушке при температурах материала менее 100 °C описывается следующей системой взаимосвязанных дифференциальных уравнений А.В. Лыкова (фильтрационный массоперенос, происходящий под действием общего перепада давлений, происходит при температурах материала более 100 °C, что нетипично для сушки строительных материалов, поэтому здесь не приводится):

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \text{div} [k(u, t)(\text{grad} u + \delta_t(u, t) \text{grad} t)], \quad (4)$$

$$c\rho_0 \frac{\partial t}{\partial t} = \text{div} (\lambda(u, t) \text{grad} t) + q\rho_0 \frac{\partial u}{\partial t}, \quad (5)$$

где u – локальное влагосодержание в высушиваемом теле, кг/(кг сух. м-ла); t – температура, °C; τ – время, с; k – коэффициент массопроводности (диффузии влаги), $\text{м}^2/\text{с}$; δ_t – относительный коэффициент термовлагопроводности,



$1/K$; c – массовая теплоемкость, Дж/(кг К); ρ_0 – плотность абсолютно сухого материала, кг/м³; λ – коэффициент теплопроводности материала, Вт/(м К); $q = \varepsilon^* r^*$ – действующий внутри тела источник внутренних фазовых превращений, Дж/(м³ К); ε^* – локальный критерий внутренних фазовых превращений, кг/кг; r^* – теплота парообразования, включая теплоту десорбции влаги, Дж/кг.

Как видно из уравнений (4), (5), в общем случае для расчета кинетики сушки тела по этим уравнениям требуются данные по шести теплофизическим характеристикам: k , δt , ρ_0 , λ , ε^* , r^* , первые пять из которых требуют специального определения. При не очень жестких температурных режимах термовлагодисперсностью можно пренебречь. Таким образом, основными коэффициентами внутреннего массотеплопереноса являются коэффициент массопроводности k , коэффициент теплопроводности λ , объемная теплоемкость ρ_0 и локальный критерий внутренних фазовых превращений ε^* . Отсутствие данных по этим коэффициентам, особенно по коэффициенту массопроводности, вынуждают применять различные полумпирические кинетические уравнения.

При сушке непористых материалов (полимеров), как отмечено выше, задача теплообмена является балансовой, поэтому при расчете кинетики сушки использование уравнения (5) не требуется, градиенты влагосодержания в теле весьма низки и, следовательно, вклад термовлагодисперсности в поток влаги пренебрежимо мал. В этом случае уравнение (4) трансформируется в следующее дифференциальное уравнение диффузии влаги:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \text{div}[D(u, t)(\text{gradu})] \quad (6)$$

где D – коэффициент молекулярной диффузии, м²/с. Уравнение (6) – нелинейное, его решения имеются только для некоторых частных случаев.

В [16] был разработан универсальный зональный метод расчета кинетики массопередачи в системах с твердой фазой, основанный на решении линеаризованного уравнения (6) ($D = \text{const}$) при постоянных параметрах внешней среды, который был использован для расчета аппаратов (в том числе сушилок) разного типа [1]. Соответствующие решения для тел разной формы приведены в [1]. Расчет проводится по формулам регулярного режима, когда в решении сохраняется один член ряда. Расчетная формула имеет вид

$$\tau_i = \frac{R_i^2}{\mu_i^2 D_i} \ln \frac{B_i}{E_i}, \quad (7)$$

где i – номер концентрационной зоны; B_i – параметр, согласно [1] равный: $B_{1,i} \gamma_i$; $B_{1,i+1}$ – первый предэкспоненциальный множитель в решении задачи массопроводности, в котором принято равномерное начальное распределение влагосодержания в теле; γ_i – коэффициент, учитывающий изменение начальной концентрации при переходе от зоны « $i - 1$ » к i -той зоне при $i > 1$; μ_i – первый положительный корень в характеристическом решении задачи массопроводности.

Общая необходимая продолжительность сушки равна

$$\tau = \sum_{i=1}^n \tau_i, \quad (8)$$

где n – число концентрационных зон.

При расчете кинетики сушки капиллярно-пористых и коллоидных капиллярно-пористых материалов необходимо параллельно рассчитывать кинетику нагрева тела, чтобы иметь возможность учитывать влияние переменной температуры на коэффициент массопроводности и рассчитывать термовлагодисперсность. Термовлагодисперсностью, однако, при температурах материала ниже 100 °С можно пренебречь. Внутренний источник теплоты в этих расчетах задать не представляется возможным из-за отсутствия информации по локальному критерию внутренних фазовых превращений, который сложным образом изменяется в процессе сушки (чем меньше радиус пор, тем меньше его роль). В расчетах, поэтому, обычно принимают, что фазовые превращения происходят у поверхности тела. В [1] получены соответствующие решения для пластины, цилиндра и шара для случая постоянной температуры внешней среды, которые используют при применении зонального метода расчета. В этих решениях граничное условие теплообмена задают в виде

$$\lambda \frac{\partial t(x)}{\partial x} \Big|_{x=R} = \alpha [t_c - t(x)|_{x=R}] - r^* \cdot i(\tau), \quad x = R, \quad (9)$$

где $i(\tau) = -\frac{d\bar{u}}{d\tau} R_V \rho_0$ – интенсивность сушки, кг/(м²/с; \bar{u} – среднееобъемное влагосодержание тела, кг/(кг сух м-ла); R_V/R – отношение объема тела к его поверхности, м; α – коэффициент теплоотдачи; Вт/(м²/с); t_c – температура внешней среды, °С; x – декартова или радиальная координата, м; R – половина толщины пластины, радиус цилиндра или шара, м.

При конвективной сушке первое слагаемое правой части уравнения (9) задает поступление тепла к поверхности тела за счет теплоотдачи, а второе слагаемое правой части – сток этого тепла на испарение влаги. Разница между ними идет на нагрев тела (левая часть уравнения (9)).

Расчет кинетики сушки на основе уравнений (4) и (5) требует данных по всем теплофизическим характеристикам, впервые такой расчет был выполнен в [17] применительно к сушке гранулированного альтакса (капиллярно-пористый материал) в ленточной сушилке. В последующем расчет кинетики сушки на основе дифференциальных уравнений массо- и теплопроводности применялся во многих работах. Были развиты эффективные программные комплексы (например, Ansys, Mathcad и др.), позволяющие рассчитывать кинетику сушки путем интегрирования нелинейных дифференциальных уравнений массо- и теплопроводности (4) и (5).

Дифференциальные уравнения массо- и теплопроводности применяются не только для расчета кинетики сушки, но и для анализа полей влагосодержаний и температур в материале. Примером могут служить совместные работы С.В. Федосова и В.Г. Котлова по анализу температурных и влажностных полей в древесине в районе нагельных соединений – на основе решений дифференциальных уравнений тепло- и массопроводности с применением расчетов, выполненных «методом микропроцессов» [18].



ВЫВОДЫ

1) Экспериментальные данные показывают, что массопроводность в строительных материалах при их сушке в большой степени зависит от того, к какому классу он относится: к классу непористых, капиллярно-пористых или коллоидных капиллярно-пористых материалов.

2) Каждому классу материалов присущи свои концентрационные и температурные зависимости коэффициента массопроводности.

3) Коэффициент массопроводности существенно зависит от влагосодержания материала, для получения адекватной математической модели кинетики сушки необходимо учитывать не только температурную, но и концентрационную зависимость коэффициента массопроводности.

4) В настоящее время общее развитие теории сушки и методов математического моделирования, повсеместное распространение персональных компьютеров, накопление данных по теплофизическим характеристикам материалов, в том числе по коэффициенту массопроводности, наличие эффективным программных комплексов обусловили практическую возможность и целесообразность расчета кинетики сушки строительных и других материалов на основе теоретических методов, предполагающих интегрирование дифференциальных уравнений массо- и теплопроводности.

5) Для расширения практического применения этих методов в инженерной практике необходимо дальнейшее накопление данных по теплофизическим характеристикам материалов и, в первую очередь, по коэффициенту массопроводности, данные по которому наиболее ограничены.

6) Для получения температурно-концентрационных зависимостей коэффициента массопроводности при сушке различных материалов рекомендуется использовать зональный метод как наиболее приемлемый в практическом отношении.

Расчеты на основе решений дифференциальных уравнений массо- и теплопроводности в настоящее время используются не только для расчета кинетики сушки, но и для анализа процессов массо- и теплопереноса в строительных конструкциях, например, в древесных конструкциях с нагельными соединениями.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Рудобашта С.П.** Массоперенос в системах с твердой фазой. М.: Химия. 1980. 248 с.
2. **Лыков А.В.** Теория сушки. 2-е изд. перераб. и доп. М.: Энергия. 1968. 422 с.
3. **Kast W., Rudobashta S.P., Planovski A.N.** Trocknung von Polyamid. Chemie-Ing.-Techn. 1976. 48. Jahrgang. Heft 7. P. 657.
4. **Rudobashta S.P.** Polymeric materials drying. Proc. International Symposium on Manufacturing and Materials Processing. August 27-31. 1990. V. 1. Dubrovnik. Yugoslavia. 1990. P. 661-678.
5. **Рудобашта С.П., Дмитриев В.М.** Кинетика и аппаратурно-технологическое оформление конвективной сушки дисперсных полимерных материалов. Инж.-физ. журнал. 2005. Т. 78. № 3. С. 51-60.
6. **Рудобашта С.П., Карташов Э.М.** Химическая технология: диффузионные процессы. В 2 ч. Ч. 2. 3-е изд. перераб. и доп. М.: 2018. 296 с.
7. **Рудобашта С.П., Карташов Э.М.** Диффузия в химико-технологических процессах. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Химия. 2010. 479 с.
8. **Климов А.М., Рудобашта С.П., Тепляков Ю.А., Нечаев В.М.** Кинетические закономерности при сушке полимеров с изменяющейся структурой. Вестник Тамбовского университета. Серия: Естественные и технические науки. 2011. Т. 16. № 6-1. С. 1474-1477.
9. **Дмитриев В.М., Рудобашта С.П., Кормильцин Г.С., Воробьев А.М.** Установка для определения коэффициентов диффузии влаги в зернистых материалах. Вестник Тамбовского университета. Серия: Естественные и технические науки. 2001. Т. 6. № 4. С. 424-427.
10. **Очнев Э.Н., Рудобашта С.П., Плановский А.Н., Дмитриев В.М.** Зональный метод определения зависимости коэффициента массопроводности от концентрации. Теор. основы хим. технологии. 1975. Т. IX. № 4. С. 491-495.
11. Бориславский В.Т., Горина С.С., Ольшанский Д.Я., Очнев Э.Н., Рудобашта С.П. А.С. 423765 СССР. Б.И. 1974.
12. **Кормильцин Г.С., Плановский А.Н., Рудобашта С.П.** Сравнение коэффициентов массопроводности при сушке в стационарных и нестационарных условиях. Теор. основы хим. технологии. 1971. Т. 5. № 4. С. 593-595.
13. **Krischer O.** Die wissenschaftlichen Grundlagen der Trocknungstechnik. Berlin-Göttingen-Heidelberg: Springer-Verlag. 1956.
14. **Чураев Н.В.** Механизм переноса влаги в капиллярно-пористых телах. Докл. АН СССР. 1963. Т. 148. № 6. С. 1361-1364.
15. **Сергеевский П.С.** Расчет процессов высыхания и увлажнения древесины. М.: Гослгбумиздат. 1952.
16. **Рудобашта С.П., Плановский А.Н., Очнев Э.Н.** Зональный метод расчета непрерывнодействующих массообменных аппаратов для систем с твердой фазой. Теор. основы хим. технологии. 1974. Т. 8. № 1. С. 22-29.
17. **Рудобашта С.П., Плановский А.Н., Долгунин В.Н.** Зональный расчет кинетики сушки гранулированного материала в плотном продуваемом слое на основе решений уравнений массо- и теплопереноса. Теор. основы хим. технологии. 1978. Т. 12. № 2. С. 173-183.
18. **Федосов С.В., Котлов В.Г.** Динамика тепло- и массопереноса в деревянных конструкциях, связанных металлическими креплениями. Технология сушки. Международный журнал. 2019. С. 1-8.

Поступила в редакцию 16.06.2021

Принята к опубликованию 21.06.2021



REFERENCES

1. **Rudobashta S.P.** Mass transfer in solid phase systems. Moscow: Khimiya. 1980. 248 p. (in Russian).
2. **Lykov A.V.** Drying theory. Ed. 2-rd. ref. and add. Moscow: Energy. 1968. 422 p. (in Russian).
3. **Kast W., Rudobashta S.P., Planovski A.N.** Trocknung von Polyamid. Chemie-Ing.-Techn. 1976. 48. Jahrgang. Heft 7. P. 657.
4. **Rudobashta S.P.** Polymeric materials drying. Proc. International Symposium on Manufacturing and Materials Processing. August 27-31. 1990. V. 1. Dubrovnik. Yugoslavia. 1990. P. 661-678.
5. **Rudobashta S.P., Dmitriev V.M.** Kinetics and apparatus-technological design of convective drying of dispersed polymeric materials. Inzh.-Phys. Journal. 2005. V. 78. N 3. P. 51-60 (in Russian).
6. **Rudobashta S.P., Kartashov E.M.** Chemical technology: diffusion processes. In 2. Part 2. 3-rd ed. trans. and add. Moscow. 2018. 296 p. (in Russian).
7. **Rudobashta S.P., Kartashov E.M.** Diffusion in chemical engineering processes. 2-rd ed. trans. and add. Moscow: Khimiya. 2010. 479 p. (in Russian).
8. **Klimov A.M., Rudobashta S.P., Teplyakov Yu. A., Nechaev V.M.** Kinetic patterns during drying of polymers with a changing structure. Bulletin of the Tambov University. Series: Natural and technical sciences. 2011. V. 16. N 6-1. P. 1474-1477 (in Russian).
9. **Dmitriev V.M., Rudobashta S.P., Kormiltsin G. S., Boroboyov A.M.** Installation for determining the coefficients of moisture diffusion in granular materials. Bulletin of the Tambov University. Series: Natural and technical sciences. 2001. V. 6. N 4. P. 424-427 (in Russian).
10. **Ochnev E.N., Rudobashta S.P., Planovski A.N., Dmitriev V.M.** Zonal method for determining the dependence of the mass conductivity coefficient on concentration. Theor. Fund. of Chem. Technol. 1975. V. IX. N 4. P. 491-495 (in Russian).
11. **Borislavsky V.T., Gorina S.S., Olshansky D.Ya., Ochnev E.N., Rudobashta S.P.** USSR Inventors certificate 423765. 1974 (in Russian).
12. **Kormiltsin G. S., Planovski A.N., Rudobashta S.P.** Comparison of mass conductivity coefficients during drying in stationary and non-stationary conditions. Theor. Fund. of Chem. Technol. 1971. V.5. N 4. P. 593-595 (in Russian).
13. **Krischer O.** Die wissenschaftlichen Grundlagen der Trocknungstechnik. Berlin-Göttingen-Heidelberg: Springer-Verlag. 1956.
14. **Churaev N.V.** The mechanism of moisture transfer in capillary-porous bodies. Reports Academy of Sciences of the USSR. 1963. V. 148. N 6. P. 1361-1364 (in Russian).
15. **Sergievsky P.S.** Calculation of the processes of drying and moistening wood. M.: State Legbumizdat. 1952 (in Russian).
16. **Rudobashta S.P., Planovski A.N., Ochnev E.N.** Zonal method for calculating continuous mass transfer apparatus for systems with a solid phase. Theor. Fund. of Chem. Technol. 1974. V. 8. N 1. P. 22-29 (in Russian).
17. **Rudobashta S.P., Planovski A.N., Dolgunin V.N.** Zonal calculation of the kinetics of drying of granular material in a dense blown layer based on solutions of the equations of mass and heat transfer. Theor. Fund. of Chem. Technol. 1978. V. 12. N 2. P. 173-183 (in Russian).
18. **Fedosov S.V., Kotlov V.G.** Dynamics of heat and mass transfer in wooden structures connected by metal fasteners. Drying Technology. International journal. 2019. P. 1-8 (in Russian).

Received 16.06.2021

Accepted 21.06.2021