

Салиева М.Г.

МЕТОДЫ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ И РАСЧЕТА
ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА В ПРОЦЕССАХ СУШКИ

Салиева М.Г.

КУРГАТУУ ПРОЦЕССТЕРИНДЕГИ ЖЫЛУУЛУК
МАССАНЫН ЖЫЛДЫРУУСУН ЭСЕПТӨӨ ЖАНА МАТЕМАТИКАЛЫК
МОДЕЛДӨӨНҮН МЕТОДДОРУ

M.G. Salieva

METHODS OF MATHEMATICAL MODELING AND CALCULATION OF HEAT AND
MASS TRANSFER IN DRYING PROCESSES

УДК: 691(075.8)

В этой статье рассматривается технология получения керамического кирпича в кирпичном заводе. Особо удалено внимание на физический процесс сушки, а также методика расчёта сушилок, проблема подвода нагретого воздуха и их последствия. Необходимо отметить сложности математической формулировки.

Ключевые слова: сушка, керамический кирпич, предприятие, минеральные ресурсы.

Бул статьяда кирпич заводундагы керамикалык кирпичти алуунун технологиясы каралат. Өзгөчө кургатуунун физикалык маанисине, ошондой эле курулуш тармагында кургатууну эсептөө ыкмасы, ысык абаны берүү проблемасы жана анын кесепеттерине көңүл бурулган. Математикалык формулировкаларынын татаалдыгын белгилеп кетүү керек.

Негизги сөздөр: кургатуу, керамикалык кирпич, өндүрүш, минералдык ресурстар.

This article discusses the technology of production of ceramic bricks in a brick factory. Particularly removed attention to the physical process of drying, and the method of calculation of dryers, the problem of supplying heated air and their consequences. It should be noted the complexity of the mathematical formulation.

Key words: drying, ceramic brick, company, mineral resources.

В последние годы экономические условия, рост стоимости энергоносителей и сырья, истощение наиболее крупных и легко доступных месторождений сырья, истощение наиболее крупных и легко доступных месторождений сырья для производства строительных материалов выдвигает на первый план проблему разработки новых ресурсо- и энергосберегающих технологий: и использование вторичных минерально- сырьевых ресурсов. В связи с этим возникает необходимость поиска новых дешёвых сырьевых источников для производства стеновых керамических изделий. Для этих целей наибольший интерес представляют золошлаковые смеси и зола гидроудаления теплоэлектростанций. Минеральная их часть по химическому и минералогическому составу близки к глинистому сырью, а органическая – позволяет использовать их в качестве топливного компонента шихты, что значительно сокращает расход топлива

на обжиг изделий, уменьшает расход исходного сырья и оздоравливает экологическую обстановку в районах золоотвалов [1,...,5].

По существующей технологии получения керамического кирпича в строительной промышленности одной из наиболее важных стадий, определяющих качество продукции и технико-экономические показатели процесса в целом, является сушка [2,...,4].

При возрастающих объемах производства строительных материалов возрастает и роль сушки, как технологического процесса. Большинство отечественных предприятий на стадии термообработки используют конвективные сушильные установки, в которых теплота к высушиваемому материалу подводится от нагретого воздуха, циркулирующего внутри установки. Чаще всего сушилки работают неэкономично, с высокими значениями удельных расходов теплоты и воздуха. В связи с этим, возникает необходимость усовершенствования технологии получения керамических изделий, позволяющей выпускать продукцию необходимого качества в требуемом количестве. Такая разработка требует теоретического и экспериментального изучения явлений тепло- и массопереноса при сушке керамических изделий, в которых часть глинистого сырья заменена золой ТЭЦ.

Методика расчета сушилок строительной отрасли базируется на тепловых и материальных балансах и применении х - у диаграммы. Они дают приближённые результаты и не позволяют решать проблемы выбора оптимальных режимных параметров процесса сушки. Методика расчёта таких процессов должна базироваться на теории теплообмена, учитывающей не только различие граничных условий, а также изменение теплофизических и массопереносных характеристик, как сушильного агента, так и высушиваемого материала.

Процесс сушки начинается при создании разности давлений паров влаги над поверхностью тела и в окружающей среде и разности температур, обеспечивающий подвод теплоты, необходимый для изменения агрегатного состояния влаги. При этом температура тела повышается лишь до определённой величины, зависящей от температуры среды и парциального

давления паров. Эта температура остаётся практически неизменной, пока испарение влаги происходит с поверхности тела, и не ограничивается интенсивностью подвода влаги из глубинных слоёв.

По мере удаления влаги вблизи поверхностных слоев материала процесс сушки начинает ограничиваться скоростью подвода влаги к поверхности испарения из глубинных слоев. При этом вначале испарение влаги продолжается с поверхности материала при непрерывном уменьшении скорости процесса и постепенном повышении температуры материала. В дальнейшем, по мере уменьшения интенсивности движения влаги, зона испарения начинает перемещаться с поверхности вглубь материала, причем более резко повышается температура его поверхности.

На практике в большинстве случаев при сушке капиллярно – пористых коллоидных тел можно выявить момент начала углубления зоны испарения, весьма важный для разработки и осуществления методов ускоренной сушки материалов. Начиная с этого момента, более интенсивно повышается температура поверхностных слоев материала, существенно замедляется удаление влаги и, самое главное, появляются поверхностные слои пересушенного материала, имеющие повышенную температуру.

В период убывающей скорости сушки при испарении влаги с поверхности материала в большинстве случаев нет опасности значительного повышения температуры материала, пересушки его поверхности слоев и ухудшения их качества. В это время целесообразно продолжать интенсивно подводить теплоту к материалу, что ускоряет процесс без ухудшения качества материала.

В период убывающей скорости сушки при углублении зоны испарения в случае сушки материалов, качество которых при повышении температуры высушенных слоев ухудшается, не допускается повышать температуру поверхности материала.

Наступление момента углубления зоны испарения зависит от условий сушки и свойств влажных тел. Интенсивность подвода теплоты к материалу в большой степени зависит от условий обтекания его элементов теплоносителем. Одним из способов повышения коэффициента теплоотдачи является повышение скорости потока относительно материала.

При сушке капиллярно-пористых тел наблюдается постепенное углубление зоны испарения внутрь тела. Температура поверхностей золокерамического кирпича непрерывно возрастает. При этом постоянно уменьшается доля свободной поверхности испарения. Возрастает влияние внутри диффузного сопротивления переносу влаги внутри материала. После прогрева материала лобовая часть образца и верхняя его грань обезвоживается. Влажность этих поверхностей становится меньше гигроскопической и интенсивность сушки падает. Толщина высушенной части поверхностей различна: на лобовой грани толщина высушенного черепка больше, чем в кормовой и боко-

вых гранях, что свидетельствует более интенсивный рост температуры лобовой грани кирпича.

Углубление зоны испарения можно рассчитать по выражению:

$$h = b \cdot \left(1 - \frac{U_i}{U_H} \right), \quad (1)$$

где U_H, U_i – начальное и текущее влагосодержание образца, кг/кг;

b – приведенная толщина тела, м; V – объем параллелепипеда, м³; F – поверхность тела, м².

Следует отметить, что изменение углубления зоны испарения во времени для образцов с различным количественным составом зола – глина будет различным, так как на процесс сушки оказывает влияние как количество золы в шихте, так и ее эквивалентный диаметр.

Коэффициент теплоотдачи от теплоносителя к высушиваемому образцу рассчитывался из теплового баланса I – той зоны кривой сушки и температурной кривой:

$$\alpha \cdot F \cdot (t_r - t_{cp}^M) \Delta \tau = m \cdot c \Delta t + m \cdot \Delta U \cdot r \quad (2)$$

где: m – масса абсолютно сухого образца, кг;

ΔU – изменение влагосодержания образца на шаге расчета, кг/кг;

r – удельная теплота парообразования, Дж/кг;

c – теплоемкость материала, Дж/кг*К;

t_r, t_{cp}^M – температура теплоносителя и средняя температура материала,

°С; $t = t_{ki} - t_i$ – изменение средней температуры образца на шаге расчета, С;

α – коэффициент теплоотдачи, Вт/м*К.

Экспериментальные данные были обработаны на ПЭВМ в виде критериального уравнения с учетом углубления зоны испарения [10]

$$N_U = 0,65 R_e^{0,5} (1 + 1,55 \cdot 10^{-4} R_e)^{0,25} \left(1 - \frac{h}{b}\right)^{0,58} \quad (3)$$

где: $R_e = \frac{W d \rho}{\mu}$, – критерий Рейнольдса;

$N_e = \alpha d \rho / \lambda$ – критерий Нуссельта; ρ, μ, λ – плотность, вязкость, теплопроводность сушильного агента;

$d \rho = \frac{4F}{\Pi}$ – определяющий размер, F – поверхность лобовой плоскости образца, м; Π – смоченный периметр лобовой плоскости образца, м; ω – скорость сушильного агента, м/с; h – приведенная глубина зоны испарения, м; b – приведенная толщина образца, м.

Коэффициент массоотдачи рассчитывался по уравнению:

$$S_h = 0,722 R_e^{0,5} (1 + 1,43 \cdot 10^{-4} R_e)^{0,25} \left(1 - \frac{h}{b}\right)^{0,845} \quad (4)$$

где: $S_h = \frac{\beta d_{\text{э}}}{D}$ – шаг расчета, сек; x_{cp} – движущая

сила процесса сушки, кг/кг; F – поверхность образца, м; ρ – коэффициент массоотдачи, м/с.

Полученные значения коэффициента массоотдачи обработаны в виде критериального уравнения с учетом углубления зоны испарения:

$$S_h = 0,722 R_e^{0,5} (1 + 1,43 \cdot 10^{-4} R_e)^{0,25} (1 - \frac{h}{b})^{0,845} \quad (5)$$

$S_h = \frac{\beta d_{\text{э}}}{D}$ – критерий Шервуда. D – коэффициент

диффузии водяного пара в воздухе м²/с.

Значения коэффициентов тепло- и массоотдачи монотонно убывают с уменьшением влагосодержания образцов. Характер этих изменений зависит от количества введенной в шихту золы и ее эквивалентного размера.

Проведение термических процессов в двухфазной системе "газ - твердое" характеризуется переносом теплоты и массы вещества как в пределах каждой из фаз, так и превращениями на границе раздела. Оказывается недостаточным характеризовать процесс только кинетической кривой убыли массы или только кривой изменения температуры. Моделирование процессов нагревания невозможно без постановки и решения краевых задач нестационарного переноса теплоты и массы вещества. В общем случае коэффициенты переноса и теплофизические свойства высушиваемого материала будут зависеть от влагосодержания и температуры, т.е. они будут изменяться во время процесса по мере продвижения объекта сушки по длине сушила.

Математическая формулировка задачи будет состоять из дифференциальных уравнений теплопроводности:

$$D = \frac{\partial t(x, y, z, \tau)}{\partial \tau} = a \nabla^2 t(x, y, z, \tau) \quad (6)$$

$$\tau = 0 \quad t(x, y, z, \tau) = t_0 \quad (7)$$

$$\alpha [t_c - t(x, \tau)] = \lambda \cdot \frac{\partial t(x, \tau)}{\partial x} + \beta \cdot \Delta P \cdot r \quad (8)$$

$$\alpha [t_c - t(y, \tau)] = \lambda \cdot \frac{\partial t(y, \tau)}{\partial y} + \beta \cdot \Delta P \cdot r \quad (9)$$

$$\alpha [t_c - t(z, \tau)] = \lambda \cdot \frac{\partial t(z, \tau)}{\partial z} + \beta \cdot \Delta P \cdot r \quad (10)$$

$$\frac{\partial t(x, \tau)}{\partial x} = 0 \quad \frac{\partial t(y, \tau)}{\partial y} = 0 \quad \frac{\partial t(z, \tau)}{\partial z} = 0 \quad (11)$$

и массопроводности

$$\frac{\partial u(x, y, z, \tau)}{\partial \tau} = k \nabla^2 U(x, y, z, \tau) \quad (12)$$

$$\tau = 0 \quad U(x, y, z, \tau) = U_0 \quad (13)$$

$$\beta [U_P - U(x, \tau)] = k \frac{\partial u(x, \tau)}{\partial x} \quad (14)$$

$$\beta [U_P - U(y, \tau)] = k \frac{\partial u(y, \tau)}{\partial y} \quad (15)$$

$$\beta [U_P - U(z, \tau)] = k \frac{\partial u(z, \tau)}{\partial z} \quad (16)$$

$$\frac{\partial u(x, \tau)}{\partial x} = 0 \quad \frac{\partial u(y, \tau)}{\partial y} = 0 \quad \frac{\partial u(z, \tau)}{\partial z} = 0 \quad (17)$$

Необходимо найти распределение температуры и влагосодержания в теле:

$$t = f(x, y, z, \tau) \quad (18)$$

$$U = \varphi(x, y, z, \tau) \quad (19)$$

Искомую функцию можно представить как произведение трех функций, каждую из которых можно написать на основании решения уравнения для неограниченной стенки, если представить параллелепипед как пересечение трех таких стенок. Искомая функция имеет вид:

$$T = \left[\frac{T(x, \tau)}{T_0} \right] \cdot \left[\frac{T(y, \tau)}{T_0} \right] \cdot \left[\frac{T(z, \tau)}{T_0} \right] \quad (20)$$

$$\Theta = \left[\frac{\Theta(x, \tau)}{\Theta_0} \right] \cdot \left[\frac{\Theta(y, \tau)}{\Theta_0} \right] \cdot \left[\frac{\Theta(z, \tau)}{\Theta_0} \right] \quad (21)$$

где: $\frac{T(x, \tau)}{T_0}$, $\frac{T(y, \tau)}{T_0}$, $\frac{T(z, \tau)}{T_0}$, $\frac{\Theta(x, \tau)}{\Theta_0}$, $\frac{\Theta(y, \tau)}{\Theta_0}$,

$\frac{\Theta(z, \tau)}{\Theta_0}$ – распределение температуры и влагосодержания в неограниченных плоскостях уг, хх, ху.

В этих условиях для создания математической модели и разработки на ее основе инженерного метода расчета воспользуемся комбинированным методом, сущность которого заключается в следующем. Время всего процесса сушки разбивается на ряд элементарных микропроцессов τ_i . Тогда в пределах i -того микропроцесса коэффициенты переноса и теплофизические свойства материала можно считать неизменными. Для каждого микропроцесса распределение полей влагосодержаний и температур будет подчиняться уравнениям взаимосвязанного тепло-массопереноса с постоянными коэффициентами и неизменными граничными условиями. При этом в

качестве начальных условий к задаче в том микропроцессе следует брать конечные распределения влагосодержаний и температур, полученные в результате решения задачи для $(i - 1)$ -го микропроцесса. Таким образом, зависимость теплофизических свойств материала от температуры и влагосодержания, можно проследить изменение полей влагосодержаний и температур материала по длине сушила.

Выводы:

1. Предложена математическая модель процесса тепломассопереноса при сушке тел конечных размеров, решённой комбинированным методом, особенностью которого является аналитическое решение краевой задачи тепломассопереноса с последующим привлечением численных методов, позволяющих учитывать изменения коэффициентов переноса и теплофизических характеристик сушильного агента и высушиваемого материала в течении процесса сушки.

2. Дано характеристика процесса сушки керамических изделий.

Литература:

1. Физико-химические аспекты комплексного использования золошлаковых смесей тепловых электростанций /В.Н. Макаров, А.А. Боброва, О.Н. Крашенинников, А.А. Пак, М.Ю. Трупигов. - Апатиты: изд. КНЦ АН СССР, 1991. - 118с.
2. Лыков М.В. Сушка в химической промышленности. - М.: Химия, 1970. - 432с.
3. Данилов О.А., Леончик Б.И. Экономия энергии при тепловой сушке. - М.: Энергоатомиздат, 1986. - 136с.
4. Данилов О.А., Власенко С.А., Коновальцев С.И. Энергосбережение в сушильных установках // Промышленная энергетика. - 1990, №10. - с.45 -47.
5. Лыков А.В. Тепло- и массообмен в процессах сушки. - М. - Л.: Госэнергоиздат, 1956. - 464с.
6. Лыков А.В. О системе дифференциальных уравнений тепломассопереноса в капиллярно-пористых телах // ИФЖ. - 1974, т.26, №1. - с.18 - 25.
7. Федосов С.В., Кисельников В.Н., Шертаев Т.У. Применение методов теории теплопроводности для моделирования процессов конвективной сушки. - Алма-Ата: Гылым, 1992. - 167с.
8. Жучков В.А. Процессы сушки в целлюлозно-бумажном производстве. М., 1965.-С.252.

Рецензент: д.ф.-м.н., профессор Сатыбаев А.Дж.