CZASOPISMO TECHNICZNE M
WYDAWNICTWO POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

z. 2-M/2008
ISSN 0011-4561
ISSN 1897-6328

СТАНИСЛАВ РУДОБАШТА*

СУШКА ГРАНУЛИРОВАННЫХ ПОЛИМЕРОВ

DRYING OF GRANULAR POLYMERICS

Аннотация

Проанализирован процесс глубокой конвективной сушки гранулированных полимеров от внутренней влаги. Предложена математическая модель процесса, рассмотрены основные факторы, определяющие его микро- и макрокинетику, обсуждены диффузионные и сорб-ционные свойства полимеров, даны рекомендации по учёту в кинетическом расчёте сушилки полидисперсности гранул и их неоднородности по времени пребывания в аппарате. Ключевые слова: диффузия влаги, сорбция, полидисперсность, продольное перемешивание гранул в аппарате.

Ключевые слова: диффузия влаги, сорбция, полидисперсность, продольное перемешивание гранул в аппарате

Abstract

The process of deep convective drying of granular polymerics from interior moisture has been analyzed. The mathematical model of the process has been offered, the main factors of the process, determining its micro- and makrokinetics, have been examined, the diffusional and sorptional characteristics have been discussed, the recommendations for granular polidispersity and their heterogeneity in time of being in apparatus accounting in kinetic calculation of dryer have been given.

Keywords: moisture diffusion, sorption, polidispersity, longitudinal mixing of granules in apparatus

* Д.т.н. профессор Станислав Рудобашта,
Московский Государственный Агроинженерный Университет.

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

Введение

Сушка полимеров осуществляется как на стадии их получения, так и при переработке в изделия [1]. В зависимости от продолжительности сушки все дисперсные полимеры можно разделить на три группы [2, 3]. К первой из них относятся полимеры, размер частиц которых составляет от десятков до сотен мкм. Они содержат поверхностную, легко удаляемую (в течение нескольких секунд) влагу. Вторая группа полимеров, имеющих те же размеры частиц, что и первая, содержит, кроме поверхностной, еще и внутреннюю влагу, удаление которой продолжается несколько минут. Третья группа, наиболее обширная, представлена гранулированными полимерами, подвергаемыми глубокой сушке, размеры частиц которых составляют несколько миллиметров. Она характеризуется значительным временем сушки (несколько часов), которое необходимо для диффузии влаги внутри частиц к их поверхности.

Внутренняя влага на стадии производства полимеров удаляется только частично или остается в материале полностью. Это приводит к неизбежности проведения глубокой сушки гранулята непосредственно перед переработкой его методами, в которых за основу приняты расплавы полимерных материалов. Присутствие влаги в расплаве полимера даже в незначительных количествах приводит к серьезным последствиям: деструкции и гидролизу расплава, снижению степени кристалличности, вспениванию массы, ухудшению прочностных свойств изделий, снижению качества поверхности изделий, локальному изменению цветности и неоднородности их светопроницания [2]. В данной работе речь пойдёт именно о глубокой сушке полимеров.

1. Кинетика глубокой сушки гранулированных полимеров

1.1. Кинетические особенности процесса

По ряду особенностей протекания процесса массопереноса при сушке полимеры существенно отличаются от классических капиллярно-пористых дисперсных материалов. Эти особенности состоят в следующем [3]:

– если для классических капиллярно-пористых и коллоидных капиллярно-пористых дисперсных материалов характерен плавный переход от первого периода сушки ко второму с соотношением продолжительности периодов $(\tau_1/\tau_2) = (1/(5\div10))$, то для гранулированных полимеров наблюдается резкий переход процесса массопереноса из внешнедиффузионной области (удаление внешней влаги) во внутридиффузионную (удаление внутренней влаги) и соотношение продолжительности периодов сушки равно $1/(10^3\ldots10^5)$,
– в силу большой величины внутридиффузионного сопротивления скорость процесса во втором периоде полностью контролируется диффузией влаги внутри частиц,
– равновесная влажность материала соизмерима с его конечной влажностью и оказывает значительное влияние на кинетику сушки,
– материал в процессе сушки быстро прогревается до температуры сушильного агента и сушка протекает в условиях практического равенства температур взаимодействующих фаз (балансовая задача теплообмена).

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

1.2. Микрокинетика сушки

Общий процесс сушки гранулированных полимеров в аппарате в соответствии с методологией системного анализа целесообразно декомпозировать на два основных уровня: микрокинетический и макрокинетический [4, 5]. На микрокинетическом уровне будем рассматривать кинетику сушки единичных гранул или дифференциально тонкого слоя материала в аппарате, а на макрокинетическом – процесс сушки всего массива гранул в нём. Для описания кинетики сушки дисперсных материалов в непрерывно действующем аппарате могут быть применены два подхода, один из которых состоит в том, что выбирается подвижная (лагранжева) система координат, которая связывается с центрами гранул, перемещающихся по аппарату, а при втором подходе, наоборот, берётся неподвижная (эйлерова) система координат, фиксированная на корпусе аппарата. В первом случае описание микрокинетики может быть осуществлено на основе уравнений взаимосвязанного тепломассопереноса А. В. Лыкова

$$\frac{\partial u}{\partial \tau} = \operatorname{div}\left[k(u,t)\cdot\left(\operatorname{grad} u + \delta_t(u,t)\cdot \operatorname{grad} t\right)\right] \tag{1}$$

$$c(u,t)\cdot \rho_0 \cdot \frac{\partial t}{\partial \tau} = \operatorname{div}\left[\lambda(u,t)\cdot \operatorname{grad} t\right] + \varepsilon^* \cdot r^* \cdot \rho_0 \cdot \frac{\partial u}{\partial \tau} \tag{2}$$

Микрокинетику сушки гранулированных полимеров целесообразно описывать на основе данного подхода, при этом в силу отмеченных выше специфических особенностей внутреннего массопереноса в полимерных материалах система уравнений (1), (2) существенно упрощается, а именно:

– отпадает необходимость интегрировать уравнение для поля температур, поскольку температуру материала можно принять равной температуре сушильного агента в окрестности гранулы,
– термовлагопроводностью можно пренебречь – ввиду незначительных температурных градиентов в материале,
– перенос влаги в материале происходит по механизму молекулярной диффузии, поэтому вместо коэффициента массопроводности $k(u, t)$, совокупно выражающего вклад во внутренний массоперенос различных механизмов [1, 6], в уравнение (1) должен входить эффективный коэффициент молекулярной диффузии $D_э(u, t)$ [1],
– из-за низких значений эффективного коэффициента диффузии влаги в материале, имеющего при температурах сушки порядок 10^{-11}–10^{-9} м^2/с, реализуется чисто внутридиффузионный кинетический режим сушки, при котором число Bi_m имеет порядок 10^3–10^6 [3].

С учётом этих факторов одномерная нелинейная микрокинетическая задача сушки гранулы полимера может быть сформулирована в виде

$$\frac{\partial u}{\partial \tau} = \operatorname{div}\left(D_э(u,t)\cdot \operatorname{grad} u\right),\ 0 < x < R,\ \tau > 0 \tag{3}$$

$$u(x,\tau) = u_H(x),\ 0 \le x \le R,\ \tau = 0 \tag{4}$$

$$u(x,\tau) = u_p,\ x = R,\ \tau > 0 \tag{5}$$

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

$$\frac{\partial u(r,\tau)}{\partial r} = 0\,,\ x = 0,\ \tau = 0 \tag{6}$$

Экспериментальные исследования показывают [1-3], что эффективный коэффициент диффузии влаги в гранулах полимеров $D_э$ существенно зависит от их влагосодержания, т.е. уравнение (3) является нелинейным. Поскольку аналитическое его решение для тел канонической формы (пластина, цилиндр, шар) отсутствует, то для инженерных расчётов нами используется зональный метод [1], сущность которого заключается в том, что весь диапазон изменения влагосодержания материала в процессе разбивается на ряд концентрационных зон, в каждой из которых коэффициент $D_э$ принимается постоянным и расчёт продолжительности сушки ведётся по линейному уравнению диффузии

$$\frac{\partial u}{\partial \tau} = D_э \cdot \Delta u \tag{7}$$

где Δ – оператор Лапласа.

Общее время сушки находится как сумма расчётных значений времени для каждого диапазона влагосодержания материала

$$\tau = \sum_{i=1}^{m} \tau_i \tag{8}$$

где m – число концентрационных зон.

Гранулы полимеров имеют форму ограниченного цилиндра, прямоугольного параллелепипеда или сферы. С учётом этого зависимость для расчёта времени сушки гранулы в i-той концентрационной зоне τ_i в регулярном режиме диффузии определяется выражением [1]

$$\tau_i = \frac{1}{D_{э,i} \cdot \sum_{j=1}^{s} \frac{\mu_j^{\,2}}{R_j^{\,2}}} \cdot \ln \frac{\prod_{j=1}^{s} B_{j,i}}{\overline{E}_i}\,,\ i = 1, 2, \ldots, m \tag{9}$$

где при $i = 1$ коэффициент $B_{j,i}$ равен предэкспоненциальному множителю в решении одномерной задачи диффузии для j-той координаты, а при $i > 1$: $B = 1$; $\overline{E}_i = (\overline{u}_{k,i} - u_{p,i}) / (\overline{u}_{H,i} - u_{p,i})$ – относительное влагосодержание гранулы в i-той концентрационной зоне; $\mu^2_{j,i}$ – корни характеристических уравнений решений задач диффузии при граничном условии первого рода; s = 1; 2; 3 – соответственно, для гранул в виде шара, конечного цилиндра и конечной пластины; R_j – радиус шара или цилиндра, половина толщины пластины.

Как видно из уравнений (3)–(7), (9), микрокинетика сушки гранул полимеров определяется диффузионными свойствами полимера и значением его равновесного влагосодержания. На рис.1 в качестве примера приведены зависимости $D_э = f(u)_t$ для полиамида П-12Э. Для остальных непористых полимеров в высокоэластическом состоянии они имеют аналогичный характер [3].

Для полимеров, содержащих микропоры, таких, например, как полистирол марки „Styron”, в области низких влагосодержаний график рассматриваемой функции проходит через минимум (рис. 2). Функции $D_э = f(u)_t$ для всех исследованных полимеров, не содержащих микропоры, возрастают с увеличением влагосодержания

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

материала и существенно зависят от температуры. Низкие значения коэффициентов диффузии ($10^{-11}\ldots10^{-9}$ м^2/с) свидетельствуют о переносе влаги в этих полимерах путем молекулярной диффузии. Возрастание эффективного коэффициента диффузии с увеличением концентрации распределяемого компонента при t = const объясняется тем, что при диффузии молекул воды увеличивается количество микрополостей между молекулами полимера. Это явление связано с пластифицирующим воздействием воды и, в ряде случаев, с уменьшением степени кристалличности полимеров.

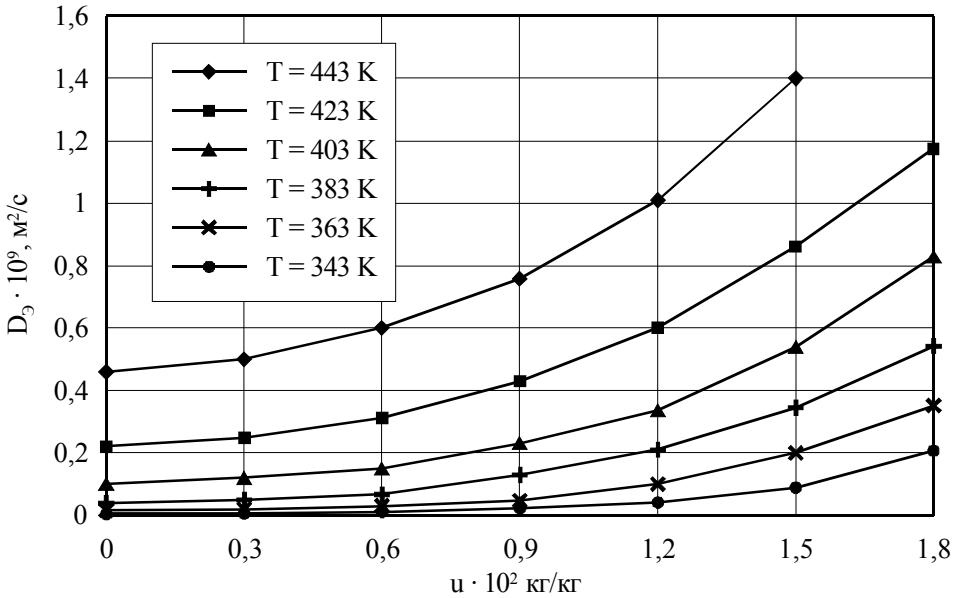

Рис.1. Температурно-влажностные зависимости эффективного коэффициента диффузии влаги в гранулированном полиамиде П-12Э

Fig. 1. Dependence of the effective rate of the diffusion of steam vs. the temperature and humidity for granulated polyamide П-12Э

Наличие воды в полимерной матрице существенно уменьшает межмолекулярные силы полимера и обусловливает повышенную сегментальную подвижность макромолекул. Температурная зависимость эффективного коэффициента диффузии влаги в полимерах хорошо описывается уравнением Аррениуса

$$D_э = D_\infty \cdot exp\left(-\frac{E_D^*}{R^* \cdot T}\right) \tag{10}$$

где E_D^* – энергия активации диффузии, необходимая для образования микрополостей (окон) и преодоления межмолекулярных сил полимера, кДж/моль.

Энергия активации диффузии уменьшается с увеличением влагосодержания материала. Указанное явление хорошо согласуется с теорией дырочной проводимости. Уменьшение энергии активации связано с пластифицирующим воздействием воды, которое приводит к увеличению подвижности молекулярных сегментов полимера, в результате чего снижается потенциальный барьер, который преодолевает молекула диффузанта при перескоке с одного положения локальной дислокации

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

в другое. Проведенная обработка полученных экспериментальных зависимостей $D_э = f(u)_t$ показала, что энергия активации диффузии E_D для исследованных полимерных материалов находится в пределах 20…60 кДж/моль, что согласуется с данными других исследований (E_D = 20…50 кДж/моль) [7]).

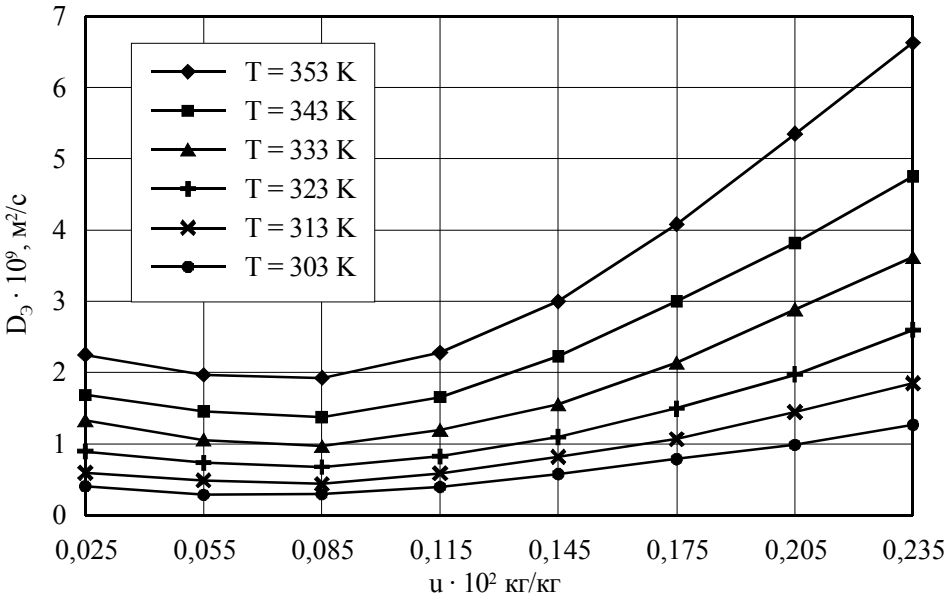

Рис. 2. Температурно-влажностные зависимости эффективного коэффициента диффузии влаги в гранулах полистирола „Styron”

Fig. 2. Dependence of the effective rate of the diffusion of steam vs. the temperature and humidity for granulated polystyrene „Styron”

Зависимости $D_э = f(u)_t$ для исследованных непористых полимеров хорошо аппроксимируются формулой вида

$$D_э = D_0 \cdot \exp\left[-bu - \frac{E_{D_0}{}^* \cdot (1 - du)}{R^* \cdot T}\right] \tag{11}$$

где D_0 – формальное значение эффективного коэффициента диффузии при $T \to \infty$; b, d – константы: $b > 0$; $0 < du < 1$.

Из сопоставления (10) и (11) имеем: $D_\infty = D_0 \cdot \exp(-bu)$, $E_D{}^* = E_{D_0}{}^* \cdot (1 - du)$. Анализ температурно-влажностных зависимостей эффективного коэффициента диффузии воды в полимерах показывает значительную зависимость коэффициента $D_э$ от потенциалов переноса t и u, следовательно, необходимость учета влияния изменяющегося температурно – влажностного состояния материала в ходе его сушки в реальных аппаратах на кинетику процесса. В [1-3, 8] приведены полученные автором с сотрудниками данные по эффективным коэффициентам диффузии влаги практически для всех гранулированных полимеров, необходимые для расчёта микрокинетики сушки, в том числе в [2, 8] – значения констант D_0, b, E_{D_0} d уравнения (11).

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

При глубокой сушке полимеров, которая осуществляется до значений влажности 0,02–0,1%, конечная влажность материала оказывается близкой к их равновесной влажности, что требует достаточно точного её знания и задания в кинетическом расчёте. Нами были исследованы гигроскопические свойства промышленных гранулированных полимеров, представленные в [1-3, 8]. На рис. 3 и 4 в качестве примера приведены эти данные соответственно для полиэтилена П-12Э и полистирола марки „Styron”.

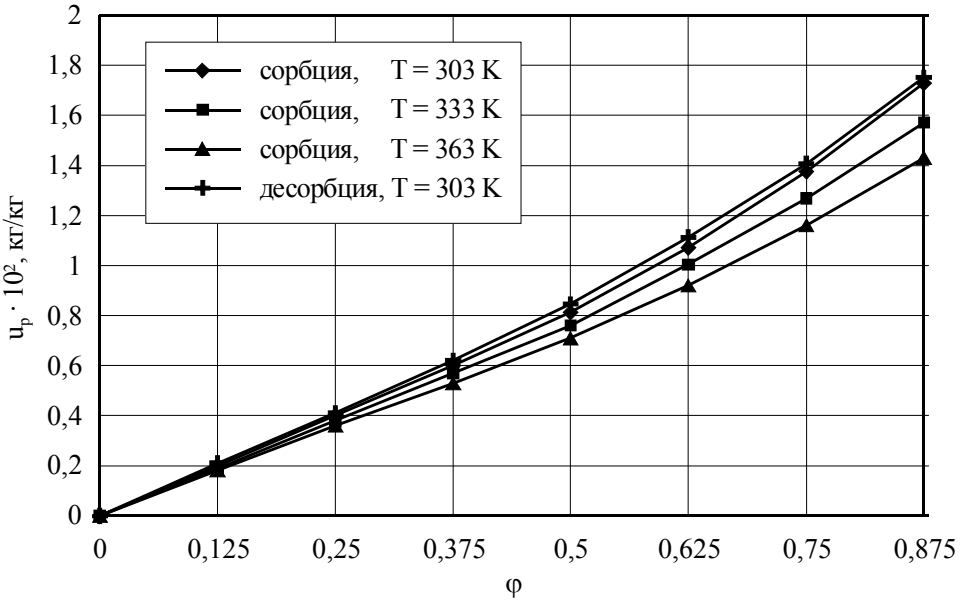

Рис. 3. Изотермы сорбции и десорбции водяного пара для гранулированного полиамида П-12Э

Fig. 3. Isotherms of sorption and desorption of steam for granulate polyamide П-12Э

Исследования показали, что изотермы сорбиции и десорбции непористых полимеров, находящихся при температурах опытов в высокоэластическом состоянии, к числу которых относится, в частности, полиамид П-12Э, не выявляют капиллярной конденсации (рис. 3).

Практическое отсутствие гистерезиса между прямыми и обратными сорбционными процессами у этих материалов, свидетельствует об абсорбционном механизме поглощения ими влаги и об отсутствии транспортно значимых пор. Количество поглощенного низкомолекулярного вещества у них зависит от соотношения аморфной и кристаллической фаз полимерной матрицы. Поглощение влаги ими происходит только аморфной частью полимера и дефектами матрицы [7]. Исследования показали также, что у непористых полимеров, находящихся в условиях экспериментов в высокоэластическом состоянии, отмечается небольшая температурная зависимость сорбции (рис. 3).

Для непористых полимеров, находящихся в стеклообразном состоянии, наблюдается сорбционно-десорбционный гистерезис во всем диапазоне относительной влажности воздуха [3]. Он характерен, например, для поликарбоната.

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

При наличии одной капиллярной конденсации гистерезис возможен только в области больших значений относительной влажности ($\varphi > 0{,}5$-$0{,}6$). Для поликарбоната гистерезис же захватывает и начальную часть изотерм сорбции-десорбции. Такое явление обусловлено малой подвижностью макромолекул застеклованного полимера, что влияет на скорость протекания релаксационных процессов в нём. По мере увеличения количества сорбированного вещества проявляется его пластифицирующее действие. Релаксационные процессы ускоряются и структура полимера становится более близкой к равновесной. Сорбционный гистерезис для застеклованных полимеров объясняется тем, что молекулы сорбата, занимая при десорбции энергетически выгодные места, развивают давление, способное раздвинуть отдельные элементы надмолекулярной структуры. При этом образуются новые доступные для сорбата места, что увеличивает сорбционную емкость полимера. Таким образом, форма петли гистерезиса для непористых застеклованных полимеров свидетельствует об абсорбционном характере поглощения ими воды.

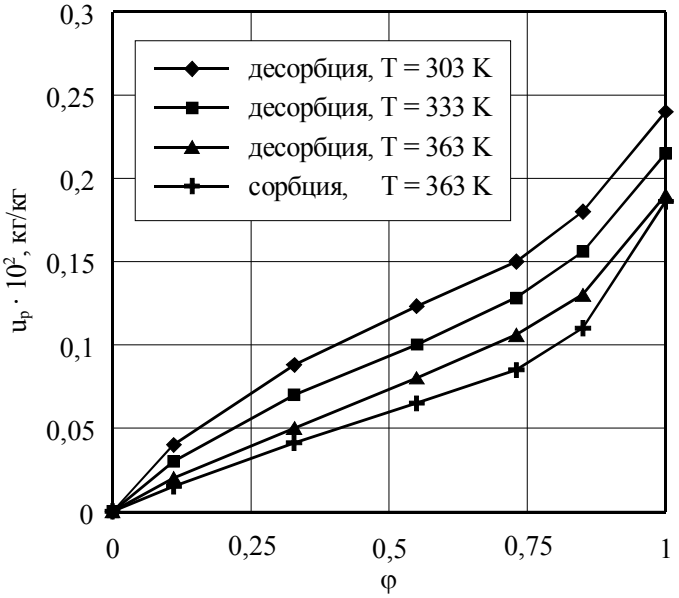

Рис. 4. Изотермы сорбции и десорбции водяного пара для гранулированного полистирола „Styron”

Fig. 4. Isotherms of sorption and desorption of steam for granulate polyamide „Styron”

Для полистирола „Styron”, находящегося в условиях эксперимента также в стеклообразном состоянии, наличие сорбционного гистерезиса объясняется не только стеклообразным его состоянием, но и микропористой структурой этого полимера [1]. Развитие пористости в подобных материалах объясняется существенным локальным уменьшением объема кристаллических областей при охлаждении расплава полимера, что является специфической особенностью полистирола исследованной марки. Петля гистерезиса для полистирола (рис. 4) также охватывает всю область относительной влажности среды, но еще более отчетливо

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

выражена, чем у поликарбоната. Это указывает на наличие абсорбционного и адсорбционного механизмов поглощения сорбата этим материалом. Таким образом, поглощение воды полистиролом „Styron” происходит как по абсорбционному, так и по адсорбционному механизмам.

1.3. Макрокинетика сушки

При переходе в описании кинетики процесса с микро- на макроуровень необходимо учитывать неоднородность гранул по размерам и по времени пребывания в аппарате. Эти факторы существенны для точности кинетического расчета и для равномерности сушки, т.е. для качества высушиваемого продукта. Для полимерных материалов это особенно важно, т.к. использование неравномерно высушенного полимерного гранулята приводит к браку при переработке его в изделия. Влияние указанных неоднородностей на среднее влагосодержание материала $\bar{\bar{u}}$ на выходе из непрерывно действующего аппарата для гранул можно учесть по уравнению

$$\bar{\bar{u}} = \int_{R_{min}}^{R_{max}} f(R) \cdot \int_{0}^{\infty} f(\tau) \cdot \bar{u}(R,\tau) \mathrm{d}R\, \mathrm{d}\tau \qquad (12)$$

где $f(R)$, $f(\tau)$ – дифференциальные массовые функции распределения частиц по размерам и по времени пребывания в аппарате; $\bar{u}(R,\tau)$ – микрокинетическая зависимость для единичных гранул радиусом R.

Путём численного моделирования процесса глубокой сушки гранулированных полимеров на основе изложенной выше микрокинетической модели, уравнения (12) и нормального закона распределения гранул по размерам и по времени пребывания в аппарате было проанализировано влияние дисперсий гранул по размерам σ_Ψ и по времени пребывания в аппарате σ_θ на зависимость относительного влагосодержания $\bar{E}$ от числа Fo_m для гранул сферической формы. На рис. 5 и 6 приведены расчётные зависимости относительного влагосодержания от числа Фурье массообменного при различных значениях дисперсий σ_Ψ и σ_θ: $\bar{E} = f(\mathrm{Fo}_m)_\sigma$ и $\bar{E} = f(\mathrm{Fo}_m)_\sigma$ [3, 9]. Из них видно, что при наличии рассматриваемых неоднородностей гранул расчет только по средним значениям $\bar{R}$ и $\bar{\tau}$ может приводить к ощутимому занижению величины $\bar{E}$. С увеличением дисперсий σ_Ψ^2 и σ_θ^2 ошибка от неучета этих неоднородностей возрастает и при величине $\bar{E} = 2 \cdot 10^{-2}$, характерной для глубокой сушки гранул полимеров, относительная ошибка расчёта времени сушки (необходимого времени пребывания материала в аппарате) при σ_Ψ^2 и $\sigma_\theta^2 > 0{,}2$ достигает 10% и более.

Для промышленно выпускаемых полимеров получены [2] функции распределения их гранул по размерам и оценена ошибка в кинетическом расчёте, возникающая от неучёта полидисперсности. Показано, что дисперсия размеров гранул зависит от технологии их получения и различна по координатам гранулы. Средняя по координатам гранулы ошибка составляет: для полиэтилентерефталата марки А – $\delta_\Psi = 15\%$; для полиамидов П-610Л, П-610Л-СВ-30, П-12Э, полипропилена, полистиролов УПМ-0703Л и „Styron”, полимера СФД ВМ-БС, литьевого поликарбоната «Дифлон» для полимера ПСМ-115 – $\delta_\Psi = 11\text{-}19\%$; для АБС-пластика 1210 – $\delta_\Psi = 32\%$ [2].

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

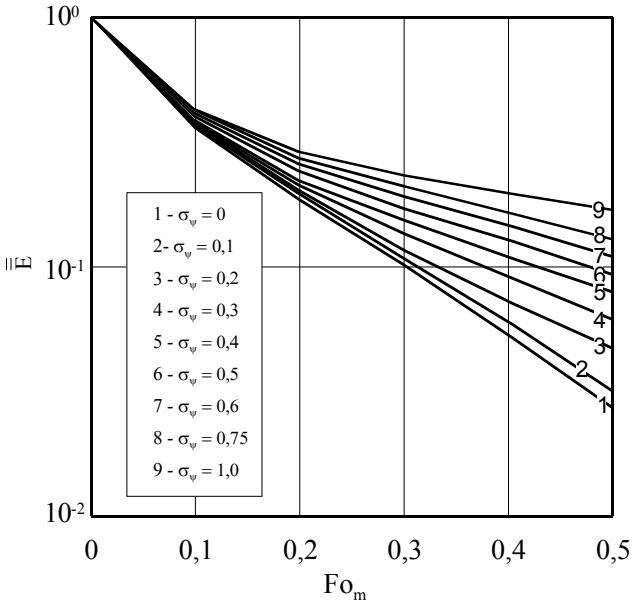

Рис. 5. Зависимости $\overline{\overline{E}} = f(\mathrm{Fo}_m)_{\sigma_\psi}$ для сферических частиц

Fig. 5. Relations $\overline{\overline{E}} = f(\mathrm{Fo}_m)_{\sigma_\psi}$ for spherical particles

Приведенные в [2] данные по δ_Ψ позволяют учесть влияние фактической полидисперсности гранул полимеров на необходимое время пребывания их в сушилке, не прибегая к расчётам по интегральному соотношению (12). Для этого вначале по уравнению зональным методом рассчитывают необходимое время пребывания в аппарате $\bar{\tau}_{\sigma_\Psi=0}$ монодисперсных гранул со средними размерами $\overline{R}_1, \overline{R}_2, \overline{R}_3$, затем, руководствуясь вышеприведенными данными, в зависимости от конкретного полимера выбирают поправку δ_Ψ и уточняют необходимое время пребывания гранул в аппарате $\bar{\tau}_{\sigma_\psi}$ при условии их полидисперсности, отвечающей определённому значению σ_Ψ

$$\bar{\tau}_{\sigma_\Psi} = \bar{\tau}_{\sigma_\Psi=0} \cdot (1 + \delta_\psi) \tag{13}$$

где $\bar{\tau}_{\sigma_\psi}$ – необходимое время пребывания полидисперсных гранул в аппарате; величина δ_ψ выражена в долях.

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

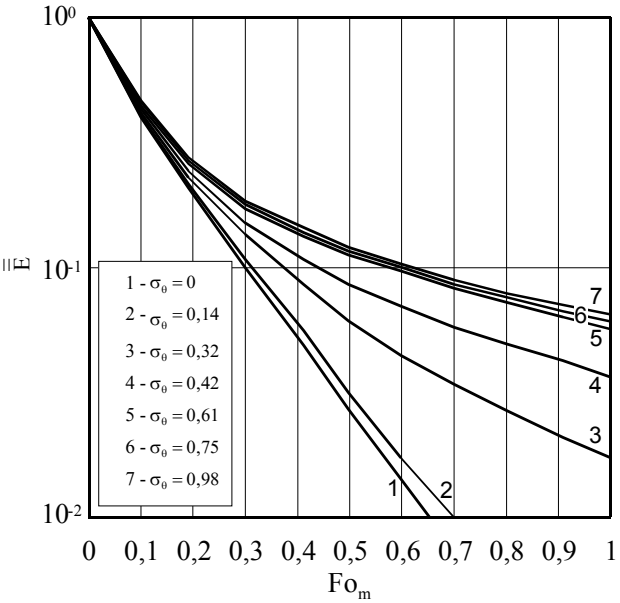

Рис. 6. Зависимости $\overline{\overline{E}} = f(\mathrm{Fo}_m)_{\sigma_\theta}$ для сферических частиц

Fig. 6. Relations $\overline{\overline{E}} = f(\mathrm{Fo}_m)_{\sigma_\theta}$ for spherical particles

Анализ структур потоков гранул полимеров в непрерывно действующих аппаратах показывает [2, 3], что при глубокой сушке с точки зрения точности кинетического расчёта следует учитывать их продольное перемешивание в аппарате. Относительная разница в величинах $\mathrm{Fo}_{m,\sigma_\theta}$ и $\mathrm{Fo}_{m,\sigma_\theta=0}$, рассчитываемых применительно к процессу глубокой непрерывной сушки гранул полимеров, в зависимости от их дисперсии по времени пребывания в аппарате σ_θ^2, которая выражается соотношением

$$\delta'_\theta = \left(\mathrm{Fo}_{m,\sigma_\theta} - \mathrm{Fo}_{m,\sigma_\theta=0}\right) / \mathrm{Fo}_{m,\sigma_\theta=0} \tag{14}$$

где величины $\mathrm{Fo}_{m,\sigma_\theta}$ и $\mathrm{Fo}_{m,\sigma_\theta=0}$ определены через среднее расходное время пребывания гранул в аппарате $\bar{\tau}$.

Зная ошибку δ'_θ, можно учесть влияние неоднородности гранул по их времени пребывания в непрерывно действующей сушилке на кинетику сушки, не прибегая к громоздким вычислениям по приводимому выше интегральному соотношению (12). Для этого вначале зональным методом рассчитывают необходимое время пребывания гранул в непрерывно действующем аппарате $\bar{\tau}_{\sigma_\theta=0}$ при условии их одинакового пребывания в нём, затем при заданной величине $\overline{\overline{E}}$, используя литературные данные по продольному перемешиванию гранул в аппарате соответствующего типа [2, 10] определяют поправку δ'_θ и уточняют необходимое

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

время пребывания материала в аппарате при условии их продольного перемешивания, отвечающего определённому значению σ_θ^2 – по уравнению

$$\bar{\tau}_{\sigma_\theta} = \bar{\tau}_{\sigma_\theta=0} \cdot \left(1 + \delta'_\theta\right) \tag{15}$$

где поправка δ'_θ выражена в долях.

При одновременном учёте полидисперсности гранул и неднородности их по времени пребывания в аппарате имеем

$$\bar{\tau}_{\sigma_\psi,\sigma_\theta} = \bar{\tau}_{\sigma_\psi=0,\sigma_\theta=0}\left(1 + \delta_{\Sigma\Psi}\right) \cdot \left(1 + \delta'_\theta\right)$$

где $\bar{\tau}_{\sigma_\psi=0,\sigma_\theta=0}$ – среднее время пребывания монодисперсных гранул в аппарате идеального вытеснения, $\delta_{\Sigma\psi}$ – поправка на полидисперсность частиц.

Фактическая величина дисперсии σ_θ^2 гранул полимеров по времени пребывания в непрерывно действующем аппарате зависит от его конструкции и от сыпучести материала. Для многих полимеров (например, полиамидов) длительное пребывание в сушильном аппарате (больше расчетного времени) приводит к пересушиванию или термической деструкции материала, что отрицательно сказывается на качестве изделий при переработке расплавов полимеров. В связи с этим снижение эффекта продольного перемешивания полимерного гранулята в сушилке не только приводит к уменьшению рабочего объёма аппарата, но и способствует сохранению качества продукта.

Символы

c	–	теплоёмкость материала	[кДж/(кг·К)]
$D_э$	–	эффективный коэффициент диффузии влаги в материале	[м^2/с]
k	–	коэффициент массопроводности	[м^2/с]
R	–	половина толщины пластины, радиус цилиндра или шара	[м]
$\bar{R}$	–	средний размер частиц (математическое ожидание)	[м]
R^*	–	универсальная газовая постоянная	[кДж/(моль К)]
r^*	–	теплота парообразования	[кДж/кг]
t, T	–	температура	[^{o}C, К]
$u, \bar{u}$	–	локальное и среднее по объему гранулы влагосодержание	[кг/кг сух. мат.]
$\bar{\bar{u}}$	–	среднее по всем гранулам влагосодержание	[кг/кг сух. мат.]
x	–	пространственная координата	[м]
φ	–	относительная влажность воздуха	
τ	–	время	[с]
$\bar{\tau}$	–	среднее (расходное) время пребывания гранул в аппарате	[с]
ρ_0	–	плотность абсолютно сухого материала	[кг/м^3]
$\sigma_\Psi = \sigma_R / \bar{R}$	–	дисперсия относительной величины $\Psi = R / \bar{R}$	
$\sigma_\theta = \sigma_\tau / \bar{\tau}$	–	дисперсия относительной величины $\theta = \tau / \bar{\tau}$	
$\mathrm{Fo}_m = \left(D_э \cdot \tau\right) / R^2$	–	число Фурье массообменное	

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

$\overline{E} = \left(\overline{u_k} - u_p\right) / \left(\overline{u_H} - u_p\right)$ – относительное влагосодержание гранулы

Индексы: н – начальный; к – конечный; р – равновесный; i –номер концентрационной зоны

Литература

[1] Рудобашта С. П.: *Массоперенос в системах с твёрдой фазой*, Химия, Москва 1980.

[2] Дмитриев В. М.: *Кинетика и аппаратурно-технологическое оформление процесса конвективной сушки гранулированных и плёночных полимерных материалов*, Дисс. докт. техн. наук. Тамбовский государственный технический университет, Тамбов 2003.

[3] Рудобашта С. П., Дмитриев В. М.: Инж.- физ. журнал, **78**, № 3, 2005, 51-60.

[4] Рудобашта С. П.: Известия РАН. Энергетика, №4, 2000, 98-109.

[5] Рудобашта С. П.: Труды 4-го Минского международного форума по тепломассообмену. 22-26 мая 2000 г., **9**. Тепломассобмен в процессах сушки, Минск 2000, 41-48.

[6] Лыков А. В.: *Теория сушки*, Изд. 2-е, перераб. и доп., Энергия, Москва 1968.

[7] Хванг С. Т., Каммермейер К.: *Мембранные процессы разделения*, Химия, Москва 1981.

[8] Рудобашта С. П., Дмитриев В. М., Плановский А. Н.: Химическое и нефтяное машиностроение, № 4, 1979, 14-16.

[9] Rudobashta S. P. etc.: Drying Technology, **16**(**7**), 1998, 1471-1485.

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ