

## КОНВЕКТИВНАЯ СУШКА ПОЛИДИСПЕРСНЫХ МАТЕРИАЛОВ В АППАРАТАХ ЗАКРУЧЕННОГО ВЗВЕШЕННОГО СЛОЯ

В.М. Дмитриев, Е.А. Сергеева

*Кафедра «Безопасность жизнедеятельности и военная подготовка»,  
ФГБОУ ВПО «ТГТУ»; bgd@mail.nnn.tstu.ru*

**Ключевые слова и фразы:** полидисперсные материалы; секционированная сушилка; сушка во взвешенном слое.

**Аннотация:** Исследован процесс сушки в аппарате с продольным секционированием. Предложена методика расчета кинетики процесса сушки для секционированных сушильных аппаратов.

---

Для многих дисперсных материалов значительная полидисперсность, разнообразие формы частиц, агрегатообразование при локальной концентрации влаги в виде пленок, термочувствительность материалов и т.д. в совокупности существенно осложняют процесс сушки. Одним из перспективных направлений интенсификации процесса сушки подобных влажных материалов является использование аппаратов с активными гидродинамическими режимами, в том числе сушилок с плотными закрученными слоями. Работа подобных аппаратов характеризуется высокой степенью турбулизации теплоносителя и значительной относительной скоростью движения взаимодействующих фаз, что обеспечивает высокие технико-экономические показатели процесса. Научный поиск в этом направлении привел к разработке целого ряда конструкций аппаратов для сушки влажных материалов в виде паст, суспензий и растворов. Существенными преимуществами этих сушилок являются низкое гидравлическое сопротивление аппаратов (на 30 – 35 % меньше аппаратов фонтанирующего и кипящего слоев) и высокий удельный влагосъем.

Для повышения эффективности сушильных аппаратов с закрученными потоками материала может быть использовано продольное секционирование однокорпусных аппаратов. Для данного конструктивного решения определены структура потоков взаимодействующих фаз, гидравлическое сопротивление, удерживающая способность слоя и время пребывания материала в аппарате.

Исследование продольного перемешивания твердой фазы проводилось методом анализа кривых вымывания трассера (меченые частицы материала) при импульсном введении трассера [5].

В многокорпусных аппаратах введение дополнительных поверхностей и увеличение стесненности потока твердой фазы, проявляющейся при  $d_M/\sigma_a > 0,1$  [9], в совокупности приводят к упорядочению структуры потока по сравнению с однокорпусными аппаратами. В этом случае устраняется прорыв теплоносителя по центру аппарата, имеющий место в однокорпусных аппаратах и приводящий к возникновению ускоренного выброса частиц из нижней части аппарата в верхнюю. Выбранный подход позволил улучшить структуру потока твердой фазы и

довести число Пекле  $Re_T$  с 2...5 для однокорпусных аппаратов до 15...24 для многокорпусных.

Анализ работ [6 – 9], приведенные исследования и конструктивные разработки выявили следующие достоинства сушильных аппаратов (цилиндрических или цилиндроконических) с закрученным потоком материала:

- простота конструкции;
- значительные величины коэффициентов тепло- и массообмена;
- возможность обработки влажных материалов со значительной дисперсией размера частиц;
- достаточно длительное время пребывания материала в рабочей зоне аппарата;
- возможность регулирования времени пребывания высушиваемого материала в аппарате;
- большая пропускная способность по газовой фазе.

Проведенный анализ особенностей удаления влаги из вторичного полимерного гранулята [3] с учетом рекомендаций по выбору типовых сушилок [4] приводит к выводу о целесообразности применения аппаратов с закрученным потоком взвешенного материала для удаления поверхностной влаги при сушке материалов этого класса [2].

Для разработки конкретных конструкций сушильных аппаратов с закрученным взвешенным слоем материала необходимы дополнительные исследования: гидродинамики, особенностей кинетики процесса сушки и структуры потоков взаимодействующих фаз.

Вторичный полимерный гранулят, полученный методом дробления, характеризуется существенной полидисперсностью и частицами разнообразных форм.

При движении полидисперсной смеси в потоке происходит взаимодействие мелких и крупных частиц материала. Расчеты и эксперименты [9] показывают, что в режиме восходящего прямотока мелкая фракция существенно увеличивает скорость крупных частиц за счет соударений. В режиме нисходящего противотока крупные фракции затормаживаются более мелкими частицами.

В наших работах в секционных аппаратах реализуются последовательные по твердой фазе режимы восходящего прямотока и нисходящего противотока. В секциях восходящего прямотока мелкие частицы за счет ударного воздействия увеличивают скорость движения крупных частиц, а в секциях нисходящего противотока крупные частицы уменьшают свою скорость при взаимодействии с более мелкой фракцией. Таким образом, указанная организация движения твердой полидисперсной фазы приводит к выравниванию времени пребывания полидисперсных частиц в исследуемых аппаратах.

Реальный вторичный гранулят, полученный методом дробления, в зависимости от вида перерабатываемых бракованных изделий и типа дробильного оборудования может иметь различный фракционный состав. Анализ более 20 партий вторичного гранулята выявил, что, несмотря на самый разнообразный характер дифференциальной кривой распределения по размерам, размеры частиц материала (эквивалентный диаметр) находятся преимущественно в интервале  $(1...5) \cdot 10^{-3}$  м.

Для исследования спектра времени пребывания частиц полидисперсного гранулята в секционированных аппаратах использовались модельный и реальные вторичные грануляты. Модельный гранулят содержал три фракции материала: 1)  $d_{\text{ч}} = 1,2 \cdot 10^{-3}$  м; 2)  $d_{\text{ч}} = 2,4 \cdot 10^{-3}$  м; 3)  $d_{\text{ч}} = 3,3 \cdot 10^{-3}$  м. Исследование времени пребывания отдельных фракций материала в аппарате проводилось методом вымывания трассера (меченые частицы материала) [5] при импульсном его введении в питающий патрубок.

Как показали эксперименты, из аппарата практически выводятся частицы всех размеров, разброс среднего времени пребывания частиц различного размера незначителен. Накопление частиц большого размера, что может иметь место при применении классических аппаратов кипящего слоя, в исследуемых сушилках не происходит.

Анализ структуры потока твердой фазы и времени пребывания частиц реального полимерного гранулята в исследуемых аппаратах показал, что улучшенная структура потока и последовательное сочетание режимов восходящего прямотока и нисходящего противотока позволяют обоснованно применять в предлагаемых аппаратах высокотемпературный теплоноситель для термолабильных и склонных к окислению при длительном воздействии высоких температур полимерных и других материалов.

Понятие объемных коэффициентов теплообмена, вводимых для расчета сушилок со сложной гидродинамикой, позволяет без учета всех сложностей действительной картины протекания процессов рассчитать требуемый объем сушилки [1].

Интенсивность массообмена при первом периоде сушки влажных материалов в аппаратах с активным гидродинамическим режимом определяется коэффициентом массоотдачи. Для кинетического расчета предлагаемых аппаратов и сравнения с интенсивностью процесса массопереноса в однокорпусных сушилках получена зависимость объемного коэффициента массоотдачи  $\beta_V$  в критериальном виде

$$\text{Nu}_{mV} = 1,067 \cdot 10^{-5} \text{Re}^{1,74} \text{Ar}^{0,11} \text{Gu}^{0,14} \text{Pr}_m^{0,35} K_a^{1,15}, \quad (1)$$

где  $\text{Re} = (1,5 \dots 2,2) \cdot 10^3$ ;  $\text{Ar} = (6 \dots 12) \cdot 10^5$ ;  $\text{Gu} = 0,4 \dots 0,5$ ;  $\text{Pr}_m = 0,8 \dots 0,82$ ;  $K_a = 0,1 \dots 0,3$ .

Сопоставление с однокорпусным сушильным аппаратом выявляет увеличение объемного коэффициента массоотдачи  $\beta_V$  на 25 – 35 %, что обусловлено введением в закрученный поток материала дополнительных тормозящих слоев поверхностей (стенок внутренних конусов), стеснением потока твердой фазы и увеличением удерживающей способности секционированных аппаратов.

При сложной гидродинамической картине протекания теплообмена, что имеет место в рассматриваемых сушильных аппаратах, целесообразно пользоваться непосредственно интенсивностью сушки, выражаемой напряжением  $A_V$  объема сушилки по испарившейся влаге [1]

$$A_V = \frac{W}{V_p \tau}, \quad (2)$$

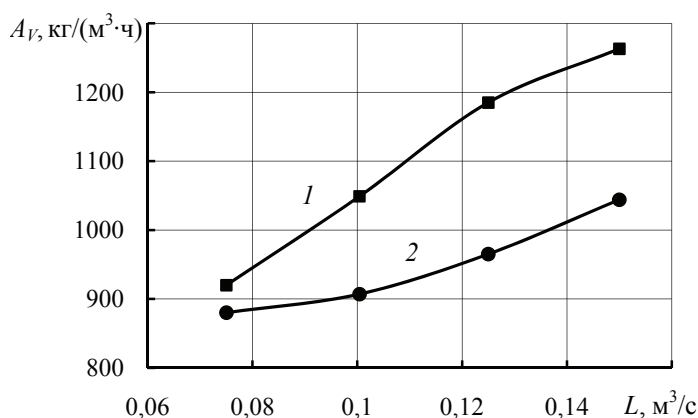
где  $V_p$  – объем рабочей камеры сушилки,  $\text{м}^3$ ;  $\tau$  – время сушки, с.

Тогда объемный коэффициент теплообмена  $\alpha_V$  равен [1]

$$\alpha_V = \frac{A_V r}{\Delta t}, \quad (3)$$

где  $\bar{\Delta t}$  – среднее значение движущей силы процесса сушки по температуре,  $^{\circ}\text{C}$ .

Для определения максимальной производительности исследуемой сушилки по испаренной влаге в аппарат подавали влажный гранулят с постепенно увеличивающимся влагосодержанием. За максимальную нагрузку по испаренной влаге принимали такое значение, при котором в слое еще не наблюдалось агрегатирование материала и появление пленочной влаги на стенках аппарата. На рисунке представлена зависимость  $A_V = f(L)$  для двухсекционной сушилки.



**Зависимость напряжения объема сушилки по испарившейся влаге  $A_V$  при сушке вторичного гранулята от расхода теплоносителя  $L$  для двухсекционной сушилки (температура теплоносителя на входе  $100^\circ\text{C}$ ):**  
 1 – модельный гранулят; 2 – реальный вторичный гранулят

Удерживающая способность аппаратов с закрученным потоком материала зависит от производительности аппарата и дисперсности высушиваемого гранулята [1]. Для гранулята, содержащего значительное количество мелкодисперсной фракции, отмечается большая удерживающая способность аппарата. При отсутствии данных о распределении частиц по размерам удерживающую способность аппарата можно определить по зависимости  $G_H = f(G_M)$  для крупнодисперсного гранулята

$$G_H = 8,91 \cdot 10^{-3} G_M^{0,84}. \quad (4)$$

Эквивалентный диаметр частиц  $d_3 = (2...5) \cdot 10^{-3}$  м;  $G_M = 30...70$  кг/ч.

Как показано ранее, вторичный полимерный гранулят обладает существенной неоднородностью начального влагосодержания. В высушиваемой партии материала могут присутствовать фракции как практически сухие, так и с незначительной, средней и максимальной влажностью. Таким образом, каждая фракция, если не учитывать вполне вероятное перераспределение влаги в процессе интенсивного движения частиц во входной части аппарата, характеризуется своим временем сушки, определяемым при прочих равных условиях начальным влагосодержанием рассматриваемой фракции. Непременным условием сушки вторичного гранулята является минимальная неоднородность конечного влагосодержания материала.

Для гарантированного удаления влаги из всех фракций материала время пребывания в рабочей зоне аппарата должно быть не менее времени сушки наиболее влажной фракции гранулята, что необходимо учитывать при проведении кинетического расчета процесса сушки.

Выполненные исследования позволяют предложить следующую методику расчета кинетики процесса сушки для секционированных сушильных аппаратов:

- 1) формирование блока исходных данных, в который входят:
  - производительность по сухому материалу  $G_M$ ;
  - распределение частиц по размерам  $f(R)$ ;
  - локальное влагосодержание материала по фракциям  $C_{м.ф}$ ;
  - входные параметры теплоносителя  $T_c, C_c$ ;

2) определение расхода теплоносителя, обеспечивающего существование устойчивого закрученного взвешенного слоя материала

$$L = v_{\text{вх}} \Sigma S_{\text{вх}}, \quad (5)$$

где  $v_{\text{вх}}$  – скорость теплоносителя на входе в аппарат (максимальная скорость, при которой образуется устойчивый закрученный поток материала и не наблюдается уноса частиц материала из слоя, равна 7...8 м/с), м/с;  $\Sigma S_{\text{вх}}$  – площадь суммарного входного сечения (2 – 4 патрубка для подачи теплоносителя), м<sup>2</sup>;

3) определение удерживающей способности аппарата  $G_{\text{н}}$  по уравнению (4);

4) расчет среднего времени пребывания частиц материала в аппарате

$$\bar{\tau} = \frac{G_{\text{н}}}{G_{\text{м}}}; \quad (6)$$

5) определение значения объемного коэффициента массоотдачи  $\beta_V^*$  по уравнению (1) по принятым входным параметрам теплоносителя;

6) определение времени сушки материала, условно считая начальное влажосодержание материала равномерным и равным влажосодержанию наиболее влажной фракции

$$\tau_c = \frac{G_{\text{м}}(C_{\text{н.ф}}^* - C_{\text{к}})}{\beta_V^* V_a \bar{\Delta} C_c}, \quad (7)$$

где  $C_{\text{н.ф}}^*$  – влажосодержание наиболее влажной фракции гранулята, кг влаги/кг сух. материала;  $V_a$  – объем рабочей зоны аппарата, м<sup>3</sup>;  $\bar{\Delta} C_c$  – среднелогарифмическая величина движущей силы по начальным и конечным параметрам сушильного агента;

7) при  $\tau_c < \bar{\tau}$  расчет закончен, в противном случае следует увеличить температуру теплоносителя.

#### *Список литературы*

1. Муштаев, В.И. Сушка дисперсных материалов / В.И. Муштаев, В.М. Ульянов. – М. : Химия, 1988. – 352 с.
2. Сажин, Б.С. Основы техники сушки / Б.С. Сажин. – М. : Химия, 1984. – 320 с.
3. Кавецкий, Г.Д. Оборудование для производства пластмасс / Г.Д. Кавецкий. – М. : Химия, 1986. – 224 с.
4. Злобин, А.Г. Влияние структуры капиллярно-пористых материалов на массопроводность при сушке : дис. ... канд. техн. наук : 05.17.08 / Злобин Алексей Григорьевич. – М., 1978. – 153 с.
5. Левеншпиль, О. Инженерное оформление химических процессов : пер. с англ. / О. Левеншпиль ; под ред. М.Г. Слинько. – М. : Химия, 1969. – 621 с.
6. Романков, П.Г. Массообменные процессы химической технологии / П.Г. Романков, Н.Б. Рашковская, В.Ф. Фролов. – Л. : Химия, 1975. – 336 с.
7. Интенсификация процесса обезвоживания суспензий красителей в сушильных установках с вихревым слоем инертного носителя / Н.М. Плотникова [и др.] // Хим. пром-ть. – 1978. – № 6. – С. 59–61.
8. Гельперин, Н.И. Тепло- и массообмен между оживающим агентом и псевдооживленными частицами в граничных условиях III-го рода / Н.И. Гельперин, В.Г. Айнштейн // Теорет. основы хим. технологии. – 1973. – Т. VII, № 1. – С. 111–115.
9. Бабуха, Г.Л. Механика и теплообмен потоков полидисперсной газовой взвеси / Г.Л. Бабуха, М.И. Рабинович. – Киев : Наук. думка, 1969. – 218 с.

## Convective Drying of Polydisperse Materials in the Apparatus for Swirled Fluidized Bed

V.M. Dmitriyev, E.A. Sergeeva

Department "Safety and Military Training", TSTU;  
bgd@mail.nnn.tstu.ru

**Key words and phrases:** drying in fluidized bed; partitioned dryer; polydisperse materials.

**Abstract:** The paper explores the process of drying in the machine with a longitudinal partitioning. The methods of calculating the kinetics of the drying process for partitioned dryers has been proposed.

---

## Konvektives Trocknen der polygranularen Materialien in den Apparaten der gedrehten abgewogenen Schicht

**Zusammenfassung:** Es ist der Prozess des Trocknens im Apparat mit der Längssektionierung untersucht. Es ist die Methodik der Berechnung der Kinetik des Prozesses des Trocknens für die sektionierten Trockenapparate angeboten.

---

## Séchage convectif des matériaux polydispersés dans les appareils de la couche pondérée torsadée

**Résumé:** Est étudié le processus du séchage dans un appareil avec un compartimentage longitudinal. Est proposée la méthode du calcul de la cinétique du processus du séchage pour les appareils de séchage avec un compartimentage.

---

**Авторы:** *Дмитриев Вячеслав Михайлович* – доктор технических наук, профессор кафедры «Безопасность жизнедеятельности и военная подготовка»; *Сергеева Елена Анатольевна* – кандидат технических наук, доцент кафедры «Безопасность жизнедеятельности и военная подготовка», ФГБОУ ВПО «ТГТУ».

**Рецензент:** *Баронин Геннадий Сергеевич* – доктор технических наук, профессор кафедры «Техническая механика и детали машин», директор НОЦ ТамбГТУ-ИСМАН «Твердофазные технологии», ФГБОУ ВПО «ТГТУ».

---