

АЛЕКСАНДР ЛИПИН, АНДРЕЙ ЛИПИН¹

МОДЕЛИРОВАНИЕ И АППАРАТУРНОЕ ОФОРМЛЕНИЕ ПРОЦЕССА ПОЛУЧЕНИЯ ПОРОШКА ПОЛИЭТИЛЕНА

MODELLING AND HARDWARE DESIGN OF POLYETHYLENE POWDER PRODUCTION

Аннотация

Приведена математическая модель процессов, протекающих в шнековом аппарате. Рассмотрена методика расчета рационального температурного режима, производительности и потребляемой мощности. Представлены экспериментальные данные о влиянии температурного режима на дисперсность порошка полиэтилена. Определена сорбционная способность порошка по различным видам нефтепродуктов.

Ключевые слова: шнековый аппарат, математическая модель, рециклинг полимеров, порошок, полиэтилен, сорбент, дисперсный состав

Abstract

The mathematical model of the processes occurring in screw device is presented. The method of calculating of the rational temperature regime, performance and power consumption is considered. Experimental data about influence of a temperature mode on dispersion of polyethylene powder are presented. The powder sorption ability to various kinds of oil products has been determined.

Keywords: screw device, mathematical modeling, polymers recycling, powder, polyethylene, sorbent, disperse composition

¹ Д.т.н., профессор Александр Геннадьевич Липин, Аспирант Андрей Александрович Липин, Ивановский государственный химико-технологический университет.

1. Введение

Полиэтилен – один из многотоннажных термопластов. Он находит широкое применение в различных отраслях промышленности, транспорта и сельском хозяйстве. Переработка отходов полиэтилена с целью получения тонкодисперсных порошков имеет большое значение не только с позиции охраны окружающей среды, но и с точки зрения сокращения расхода первичных полимеров, поскольку в условиях дефицита сырья полимерные отходы являются мощным сырьевым ресурсом. Полимерные порошки используются в качестве наполнителей, входящих в состав различных композиционных материалов, порошковых красок, сорбентов нефти и нефтепродуктов, для нанесения высокоэффективных антикоррозионных покрытий.

В статье представлены результаты исследований процесса получения полимерных порошков из отходов полиэтилена низкой плотности. Перерабатывались растворы (гели) полиэтилена с помощью шнекового аппарата (рис. 1), имеющего три последовательно расположенные зоны: зона дозирования А (шнек); зона измельчения Б (ротор), зона выгрузки В (шнек).

Гель полимера поступает в дозирующую камеру, где его температура поддерживается с помощью теплоносителя. Из дозирующей камеры материал под давлением поступает в концентрический зазор измельчительной камеры, стенки которой охлаждаются, с помощью хладагента циркулирующего через рубашку аппарата. Полимер переходит в аморфно-кристаллическое состояние при одновременном воздействии на него сдвиговых деформаций, вызываемых вращением ротора, в результате чего наблюдается образование тонкодисперсного порошка, который поступает в зону выгрузки, где осуществляется удаление растворителя путем испарения под вакуумом и подвода теплоты от стенок корпуса.

Получаемые по данной технологии порошки имеют размер частиц менее 400 мкм [1].

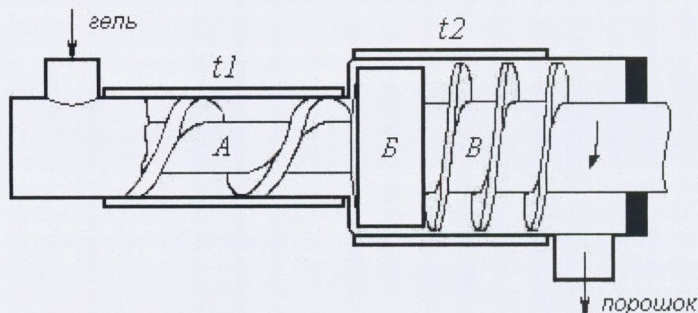


Рис. 1. Схема шнекового аппарата

Fig. 1. The scheme of screw device

2. Математическая модель

С целью прогнозирования рациональных режимных и конструкционных параметров шнекового аппарата выполнена разработка математической модели, включающей уравнения движения материала, переноса теплоты, материального и энергетического балансов [2].

При расчете теплопереноса в шнековом аппарате необходимо в начале определить его производительность. Для определения массового расхода G_P и давления P геля полимера на входе в зону (Б), воспользуемся уравнениями (1) и (2), характеризующими подачу, обеспечиваемую зоной дозирования G_A , и расходную характеристику G_B зоны охлаждения [3]:

$$G_A = \rho_p \cdot \left(\frac{V_{Z(a)}}{2} \cdot B_a \cdot H_a \cdot F_g - \frac{B_a \cdot H_a^3 \cdot F_p \cdot (P - P_{ex})}{12\eta_a \cdot z_a} \right) \quad (1)$$

$$G_B = \rho_p \cdot \frac{\pi \cdot D_p \cdot h^3 \cdot (P - P_{вых})}{12 \cdot \eta_6 \cdot L_p} \quad (2)$$

Искомые параметры находим путем совместного решения уравнений (1), (2) полагая, что в стационарном режиме $G_P = G_A = G_B$. На рис. 2 приведены результаты расчета производительности лабораторного аппарата с диаметром червяка 26 мм и диаметром ротора 38 мм.

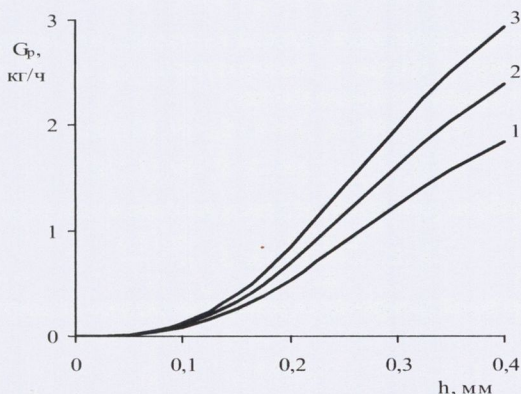


Рис. 2. Зависимость производительности шнекового аппарата от величины зазора в зоне охлаждения: 1 - $n = 25 \text{ мин}^{-1}$; 2 - $n = 50 \text{ мин}^{-1}$; 3 - $n = 75 \text{ мин}^{-1}$

Fig. 2. The screw device efficiency vs. clearance space in cooling area:
1 - $n = 25 \text{ min}^{-1}$; 2 - $n = 50 \text{ min}^{-1}$; 3 - $n = 75 \text{ min}^{-1}$

При моделировании теплопереноса одновременно в зонах дозирования (А) и охлаждения (Б) принималось допущение об одномерности температурных полей ротора, червяка и полимера. Рассматривался установившийся режим. Для описания

теплопереноса в теле ротора и червяка воспользовались уравнением для стержня с боковым теплообменом. Так как они имеют разное сечение, то уравнения записаны для каждого из них:

$$\lambda \cdot S_{\text{ч}} \cdot \frac{d^2 t_s}{dx^2} - \alpha_a \cdot \Pi_{\text{ч}} \cdot (t_s - t_p) = 0, \quad 0 < x < L_1 \quad (3)$$

$$\lambda \cdot S_p \cdot \frac{d^2 t_s}{dx^2} - \alpha_b \cdot \Pi_p \cdot (t_s - t_p) = 0, \quad L_1 < x < L_2 \quad (4)$$

Изменение температуры полимера характеризуется уравнениями теплового баланса:

$$c_p \cdot G_p \cdot \frac{dt_p}{dx} = \alpha_a \cdot \Pi_{\text{ч}} \cdot (t_s - t_p) + \alpha_a \cdot \Pi_{\text{к(а)}} \cdot (t_{\text{сП(а)}} - t_p) + q_{\text{д(а)}}, \quad 0 < x < L_1 \quad (5)$$

$$c_p \cdot G_p \cdot \frac{dt_p}{dx} = \alpha_b \cdot \Pi_p \cdot (t_s - t_p) + \alpha_b \cdot \Pi_{\text{к(б)}} \cdot (t_{\text{сП(б)}} - t_p) + q_{\text{д(б)}}, \quad L_1 < x < L_2 \quad (6)$$

Первые слагаемые правой части этих уравнений представляют собой тепловой поток от тела червяка и ротора, вторые слагаемые – тепловой поток от стенок корпуса, третьи слагаемые – тепловой поток за счет диссипации механической энергии.

Внутренние источники теплоты за счет диссипации механической энергии в зонах А и Б определяются соотношениями:

$$q_{\text{д(а)}} = \eta_a \cdot \gamma_a^2 \cdot H_a \cdot B_a \quad (7)$$

$$q_{\text{д(б)}} = \eta_b \cdot \gamma_b^2 \cdot \frac{\pi}{4} (D_{\text{к(б)}}^2 - D_p^2) \quad (8)$$

При формулировании граничных условий считалось, что на торцах червяка имеет место перенос теплоты к средам с температурами $t_{c,0}$, $t_{c,1}$. С помощью тепловых проводимостей σ_0 , σ_1 задаем тепловые потоки:

$$\sigma_0 \cdot (t_s(0) - t_{c,0}) = \lambda \cdot S_{\text{ч}} \cdot dt_s(0)/dx \quad (9)$$

$$\sigma_1 \cdot (t_s(L_2) - t_{c,1}) = -\lambda \cdot S_p \cdot dt_s(L_2)/dx \quad (10)$$

На границе зон потребуем равенства тепловых потоков в теле червяка и ротора:

$$\lambda \cdot S_{\text{ч}} \cdot \frac{dt_s(L_1)}{dx} = \lambda \cdot S_p \cdot \frac{dt_s(L_1)}{dx} \quad (11)$$

На левой границе зоны дозирования задаем начальную температуру полимерного геля:

$$t_p(0) = t_H \quad (12)$$

Решение поставленной задачи целесообразно осуществлять методом последовательных приближений в следующей последовательности:

1. Задаем температурное поле рабочего органа шнекового аппарата, как равномерное $t_s(x) = t_s^0$;
2. Решаем уравнения (5) и (6), определяем функцию $t_p(x)$;
3. Решаем уравнения (3) и (4), находим функцию $t_s(x)$;
4. Проверяем критерий окончания итерационного процесса

$$\max |t_{s,n}^{(i-1)} - t_{s,n}^i| < \varepsilon \quad \text{при } n = 0, 1, \dots, N,$$

здесь i – номер итерации.

Если отклонение в каком либо узле расчетной сетки в двух последующих приближениях больше заданного ϵ , расчеты повторяются, начиная с пункта 2.

С помощью предложенной математической модели можно прогнозировать производительность и тепловой режим шнекового аппарата в зависимости от его конструктивных параметров.

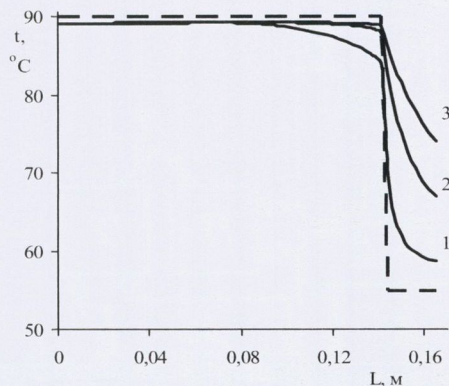


Рис. 3. Распределение температуры полимерного геля по длине аппарата при различных зазорах между ротором и стенкой корпуса в зоне охлаждения:
1 – $h = 0,2$ мм; 2 – $h = 0,3$ мм; 3 – $h = 0,4$ мм

Fig. 3. Polymeric gel temperature distribution on device length at various clearance spaces between a rotor and an apparatus wall in a cooling area: 1 – $h = 0.2$ mm; 2 – $h = 0.3$ mm; 3 – $h = 0.4$ mm

На рис. 3 приведены результаты математического моделирования распределения температур по длине аппарата (лабораторный аппарат), где пунктирная линия – температура стенки аппарата, сплошная – температура полимерного геля. Графики показывают, что увеличение зазора в зоне охлаждения существенным образом влияет на температурный режим шнекового аппарата. Температура полимера в зоне охлаждения с увеличением зазора повышается с 59 до 74 °C, что значительно повлияет на дисперсность получаемого полимерного порошка.

Программная реализация решения уравнений математической модели выполнена в программном пакете Mathcad и использована при расчете опытно-промышленной установки.

3. Экспериментальная часть

Экспериментальные исследования процесса получения полимерного порошка проводились на лабораторной установке, схема которой приведена на рис. 4.

Установка работает следующим образом. Первой стадией процесса является приготовление полимерного геля. В реактор 5 загружается полиэтилен в виде крупной крошки и растворитель – толуол. Процесс ведется при включенной мешалке

и подводе теплоты от электронагревателя 8. Температура в емкостном реакторе 5 поддерживается и контролируется с помощью регулятора температуры 13. С целью предотвращения нарастания давления в реакторе в связи с испарением части растворителя, используется теплообменник-конденсатор 10 в качестве обратного холодильника.

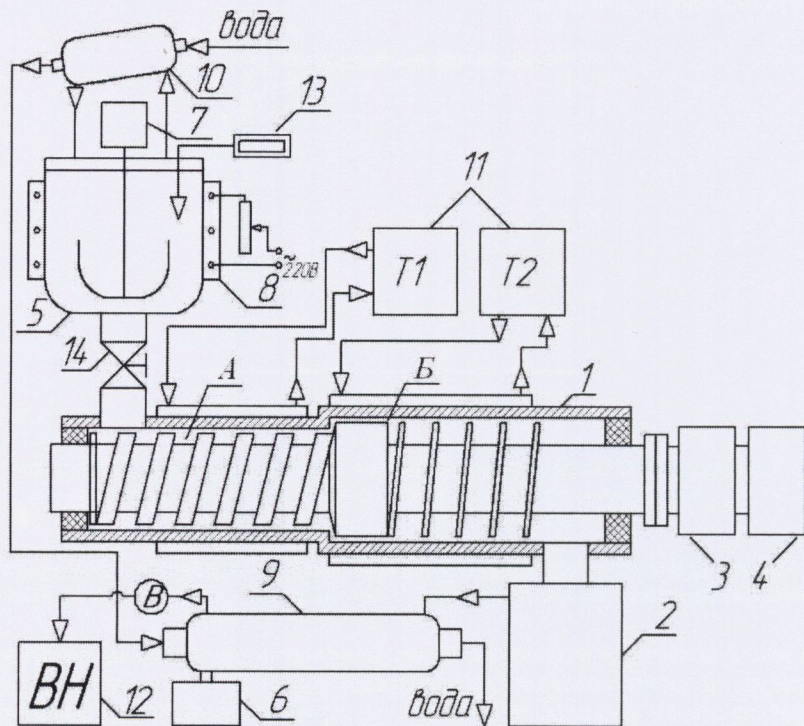


Рис. 4. Схема лабораторной установки: 1 – корпус аппарата; 2 – сборник порошка; 3 – редуктор; 4 – электродвигатель; 5 – емкостной реактор; 6 – сборник растворителя; 7 – электропривод мешалки; 8 – электронагреватель; 9, 10 – теплообменник-конденсатор; 11 – термостаты T1 и T2; 12 – вакуум-насос; 13 – регулятор температуры; 14 – вентиль

Fig. 4. The laboratory equipment scheme: 1 – device body; 2 – powder collector; 3 – reducer; 4 – electric motor; 5 – the storage reactor; 6 – solvent collector; 7 – the mixer electric drive; 8 – electro heater; 9, 10 – heat exchanger – condenser; 11 – thermostats T1 and T2; 12 – vacuum pump; 13 – temperature regulator; 14 – gate.

После окончания процесса приготовления полимерного геля включается электродвигатель 4, который через редуктор 3 приводит в движение шнек аппарата 1. Открывается вентиль 14 и гель поступает в дозирующую камеру (А), где его температура поддерживается с помощью термостата T1. Из дозирующей камеры материал под давлением поступает в концентрический зазор камеры охлаждения (Б), где он охлаждается до определенной температуры с помощью теплоносителя от

термостата Т2 циркулирующего через рубашку аппарата. Полимер переходит в аморфно-кристаллическое состояние при одновременном воздействии на него сдвиговых деформаций, вызываемых вращением ротора, в результате чего наблюдается образование тонкодисперсного порошка, который поступает в сборник продукта 2.

С целью удаления из полученного порошка растворителя сборник продукта вакуумируется. Разрежение в системе создается с помощью вакуум-насоса 12. Пары растворителя поступают в теплообменник-конденсатор 9, охлаждаемый водой. Полученный конденсат собирается в сборнике 6 и в дальнейшем повторно используется.

Проведенные эксперименты показали, что размер частиц образующегося порошка полимера существенно зависит от концентрации полимерного геля и температурного режима в зоне охлаждения.

На рис. 5 приведены зависимости среднего размера частиц от температуры теплоносителя, поступающего в рубашку аппарата при различных концентрациях полимерного геля. Снижение температуры теплоносителя в рубашке в зоне охлаждения с 55 до 46°C приводит к уменьшению среднего размера полимерных частиц в 1,2 ÷ 1,5 раза в зависимости от концентрации раствора полимера. Дисперсность порошка определяли ситовым анализом.

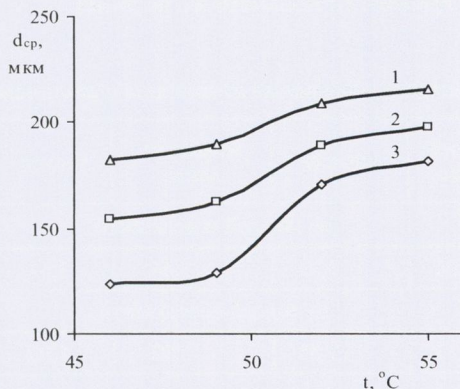


Рис. 5. Зависимость среднего размера полимерных частиц от температуры теплоносителя в зоне охлаждения при различной концентрации геля: 1 – 50%; 2 – 45%; 3 – 40%

Fig. 5. The average polymeric particles size vs. heat-carrier temperature in the cooling area at different gel concentration: 1 – 50%; 2 – 45%; 3 – 40%

На рис. 6 приведен дисперсный состав полимерного порошка, полученного в опыте с параметрами $t_{CT(a)} = 90$ °C; $C_p = 40\%$; $n = 25$ об/мин. Из приведенных гистограмм видно, что порошок полученный при температуре 55°C имеет 51% частиц с размером 160 ÷ 400 мкм, тогда как при снижении температуры до 46°C это число снижается до 23%, увеличивается содержание фракции меньше 100 мкм с 22 до 49%.

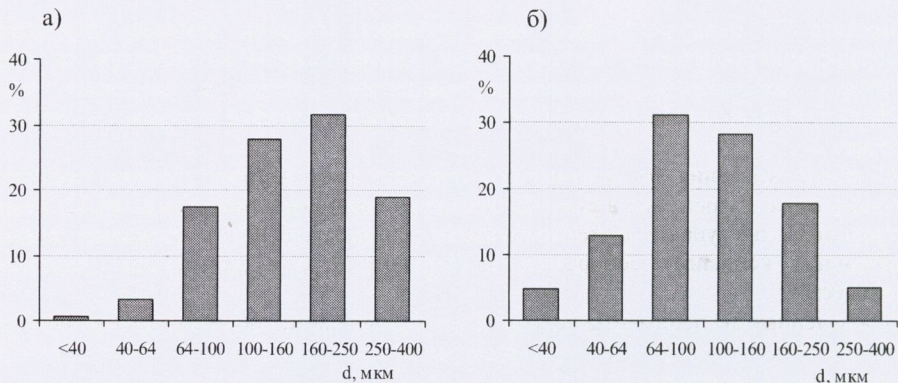


Рис. 6. Дисперсный состав полимерного порошка: а) $t_{CT(6)} = 55^\circ\text{C}$; б) $t_{CT(6)} = 46^\circ\text{C}$

Fig. 6. Disperse structure of a polymeric powder: а) $t_{CT(6)} = 55^\circ\text{C}$; б) $t_{CT(6)} = 46^\circ\text{C}$

Выполнена оценка сорбционной емкости полученного порошка полиэтилена по отношению к различным жидкостям (табл. 1). Под максимальной сорбционной емкостью понимается количество жидкости (см^3), связываемой и удерживаемой в течение длительного времени 1 г полимерного порошка.

Таблица 1

Сорбционная емкость порошка по отношению к различным жидкостям

Сорбируемая жидкость	дизельное топливо	керосин	машинное масло	толуол	бензин Аи-92	нефть
на твердой поверхности						
$\beta_{\text{max}}, \text{см}^3/\text{г}$	3,08	3,33	3,64	3,64	4,00	4,00
на водной поверхности						
$\beta_{\text{max}}, \text{см}^3/\text{г}$	4,17	3,33	3,92	5,00	5,40	6,67

По сорбционной емкости полученный порошок полиэтилена не уступает таким порошкообразным сорбентам как Turbo-Jet (Франция), Peat-Sorb (Канада), Эколан (Россия), СибСорбент-1 (Россия) [4].

4. Заключение

Создана установка для получения порошка полиэтилена из его концентрированного геля. Выполненные экспериментальные исследования показали, что получаемый порошок полиэтилена имеет средний размер частиц в диапазоне $125 \div 215$ мкм при температурах в зоне охлаждения шнекового аппарата $46 \div 55^\circ\text{C}$, концентрации полимерного геля $35 \div 50\%$ и числе оборотов рабочего органа

25 об/мин. Средний размер частиц порошка полиэтилена уменьшается с понижением температуры в зоне охлаждения и снижении концентрации полимерного геля. Разработана математическая модель шнекового аппарата, позволяющая прогнозировать температурный режим, производительность и потребляемую мощность. Достаточная сорбционная емкость позволяет рекомендовать полученный порошок полиэтилена в качестве сорбента нефтепродуктов.

Обозначения

B_a	– ширина канала червяка в зоне дозирования	[м]
c_p	– удельная теплоемкость полимерного геля	[дж/кг·К]
D_p	– диаметр ротора	[м]
$D_{ч(a)}$	– диаметр червяка в зоне дозирования	[кг/с]
e_a	– ширина гребня червяка в зоне дозирования	[кг/с]
F_g, F_p	– коэффициенты формы поступательного потока и противотока	[–]
G_{II}, G_p	– массовые расходы полимерного порошка и полимерного геля	[кг/с]
H_a	– глубина канала червяка в зоне дозирования	[м]
h	– высота зазора между ротором и стенкой корпуса в зоне охлаждения	[м]
L_p	– длина ротора	[м]
$L_{ч(a)}$	– длина червяка в зоне дозирования	[м]
n	– частота вращения рабочего органа	[с ⁻¹]
$P_{вх}, P_{вых}$	– давления на входе и выходе из диспергатора	[Па]
$S_p, S_{ч}$	– площади поперечного сечения ротора и червяка в зоне дозирования	[м ²]
t, t_p	– температуры полимерного порошка и полимерного геля	[°С]
$t_{CT(a)}, t_{CT(b)}$	– температуры стенки корпуса диспергатора в зоне дозирования и охлаждения	[°С]
t_S	– температура рабочего органа	[°С]
z_a	– длина винтового канала червяка	[м]
$Π_p, Π_{ч}$	– периметры ротора и червяка в зоне дозирования	[м]
$Π_{K(a)}, Π_{K(b)}$	– периметры корпуса диспергатора в зонах дозирования и охлаждения	[м]
$α_A, α_B$	– коэффициенты теплоотдачи в зонах дозирования и охлаждения	[Вт/(м ² ·К)]
$γ_A, γ_B$	– средняя скорость сдвига в зоне дозирования и охлаждения	[с ⁻¹]
$η_A, η_B$	– вязкости полимерного геля в зонах дозирования и охлаждения	[Па·с]
$λ$	– теплопроводность материала рабочего органа диспергатора	[Вт/(м·К)]
$ρ_p$	– плотность полимерного геля	[кг/м ³]

Литература

- [1] Евсеев О. В., Липин А. Г.: Изв. вузов. Химия и химич. технология, Т. 53, Вып. 9, (2010), 128-129.
- [2] Евсеев О. В., Липин А. Г., Шкурин Ю. М.: Журн. Совр. наукоем. Технологии, Региональное приложение Иваново, 4, (2009), 60-64.
- [3] Евсеев О. В., Липин А. Г., Кириллов Д. В.: Журн. Совр. наукоем. Технологии, Региональное приложение Иваново, 1, (2010), 51-56.
- [4] Долгих О. Г., Овчаров С. Н.: Экол. и пром. России, 11, (2009), 4-7.